

## บทที่ 4

### ผลและการอภิปรายผล

ในบทนี้จะนำเสนอผลการทดลองและอภิปรายผลซึ่งแบ่งเป็นสองส่วนคือเยื่อบางไคโตซาน และเยื่อประกอบโพลีเอเทอร์ซัลโฟน/ไคโตซาน ดังนี้

#### 4.1 การทดสอบเยื่อบางไคโตซาน CH2D, CH2PH, CH25PEG และ CH28PEG

##### 4.1.1 สมบัติทางกายภาพของเยื่อบาง

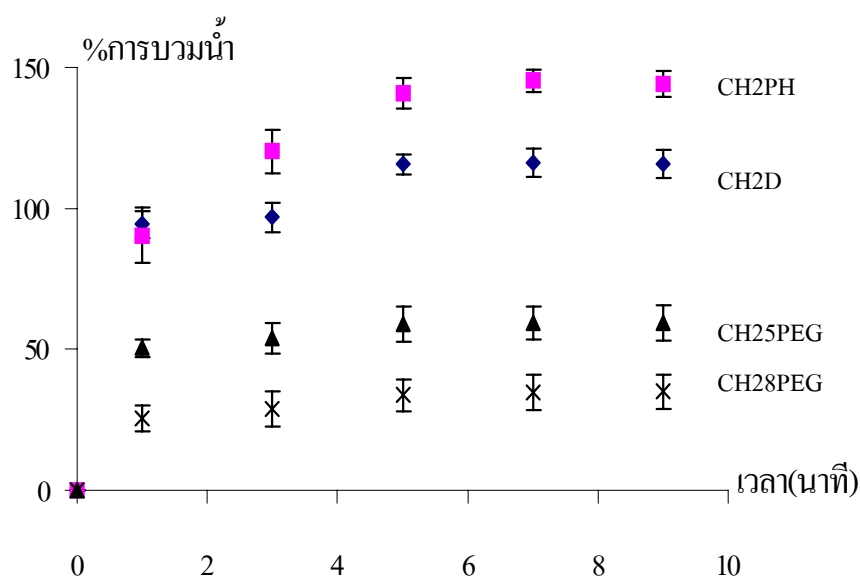
เยื่อบางที่เตรียมได้แบ่งออกเป็น 2 วิธี คือ วิธีอบแห้ง ซึ่งได้แก่ เยื่อบาง CH2D และ วิธีเปลี่ยนเฟส ซึ่งได้แก่ เยื่อบาง CH2PH, CH25PEG และ CH28PEG มีความหนาและลักษณะของสีแตกต่างกันดังแสดงในตาราง 3 จะเห็นว่าเยื่อบางอบแห้งจะบางที่สุดและเยื่อบางเตรียมโดยวิธีเปลี่ยนเฟสจะมีความหนาเพิ่มขึ้นซึ่งสอดคล้องกับ Robert (1971) กล่าวว่าเยื่อบางที่เตรียมโดยวิธีแบบอบแห้งจะมีความหนาน้อยกว่าการเตรียมโดยวิธีเปลี่ยนเฟส เมื่อพิจารณาเยื่อบางที่เตรียมโดยวิธีเปลี่ยนเฟสพบว่าเยื่อบาง CH2PH บางกว่าเยื่อบาง CH25PEG และ CH28PEG ทั้งๆ ที่ใช้วิธีการเตรียมเดียวกันแสดงว่าการเติม PEG ลงไปในสารละลายไคโตซานมีผลต่อความหนาของเยื่อบาง

ตาราง 3 แสดงคุณสมบัติทางกายภาพของเยื่อบาง CH2D, CH2PH, CH25PEG และ CH28PEG

เยื่อบาง	วิธีการเตรียม	ความหนา (ไมครอน)	ลักษณะของสี
CH2D	อบแห้ง	$82.67 \pm 5.21$	สีใส
CH2PH	เปลี่ยนเฟส	$89.32 \pm 2.14$	สีขาว ค่อนข้างขุ่น
CH25PEG		$98.58 \pm 5.21$	สีขาว ขุ่นมาก
CH28PEG		$101.06 \pm 6.31$	สีขาว ขุ่นมากที่สุด

#### 4.1.2 การบวมน้ำของเยื่อบางไคโตซาน

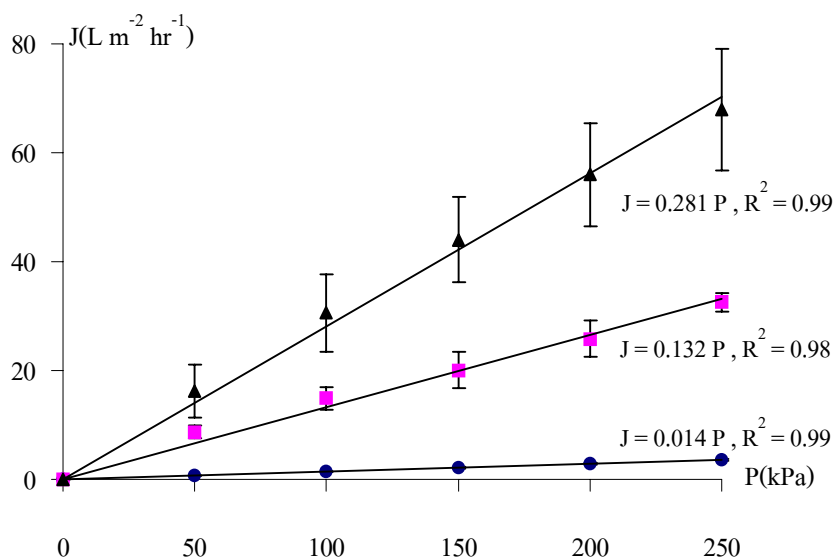
จากการทดลองดังรายละเอียดในหัวข้อ 3.4.1 การบวมน้ำของเยื่อบางแต่ละชนิดได้แสดงดังภาพประกอบ 21 เรียงตามลำดับจากมากไปหาน้อยดังนี้ เปอร์เซ็นต์การบวมน้ำของเยื่อบาง CH2PH สูงกว่าเยื่อบาง CH2D, CH25PEG และ CH28PEG โดยมีค่าเท่ากับ  $140.80 \pm 5.39$  ,  $115.59 \pm 4.19$  ,  $58.93 \pm 6.29$  ,  $33.78 \pm 5.70$  ตามลำดับ จะเห็นว่าเยื่อบางที่ผสม PEG เพื่อช่วยให้เกิดรูพรุนสามารถดูดซับน้ำได้น้อยลง ทำให้เยื่อบางบวมน้ำลดลง และเยื่อบางทั้งสี่ชนิดสามารถดูดน้ำได้อิ่มตัวใน 5 นาที แสดงว่าก่อนนำเยื่อบางทดสอบปลั๊กซ์ของน้ำต้องแช่เยื่อบางในน้ำอย่างน้อย 5 นาที



ภาพประกอบ 21 เปอร์เซ็นต์การบวมน้ำของเยื่อบาง CH2D, CH2PH, CH25PEG และ CH28PEG

#### 4.1.3 ปลั๊กซ์น้ำดี

ทดสอบปลั๊กซ์น้ำดีผ่านเยื่อบาง CH2D พบว่าแม้จะใช้ความดันสูงถึง 900 kPa น้ำไม่สามารถผ่านเยื่อบางได้ แสดงว่าเยื่อบาง CH2D อาจจะมีแบบแน่น (dense membrane) หรือไม่มีรูพรุน และภาพประกอบ 22 แสดงปลั๊กซ์น้ำดีที่ผ่านเยื่อบาง CH2PH, CH25PEG และ CH28PEG เทียบกับความดันจะเห็นว่าปลั๊กซ์น้ำดีของเยื่อบาง CH28PEG มีค่าสูงกว่าปลั๊กซ์น้ำดีของเยื่อบาง CH25PEG ที่ทุกๆ ความดัน ส่วนเยื่อบาง CH2PH ปลั๊กซ์น้ำดีมีค่าน้อยที่สุด แสดงว่าเยื่อบางที่ผสม PEG ลงในสารละลายไคโตซานช่วยให้มีปลั๊กซ์น้ำดีสูงขึ้นสอดคล้องกับผลของ Yang and Zall (1984) ซึ่งเกิดจากเยื่อบางมีรูพรุนหรือขนาดรูเพิ่มขึ้นจะศึกษาจากภาพถ่าย SEM ในหัวข้อ 4.1.7



ภาพประกอบ 22 ฟลักซ์น้ำดีเยื่อบาง CH2PH (●), CH25PEG (■) และ CH28PEG (▲)

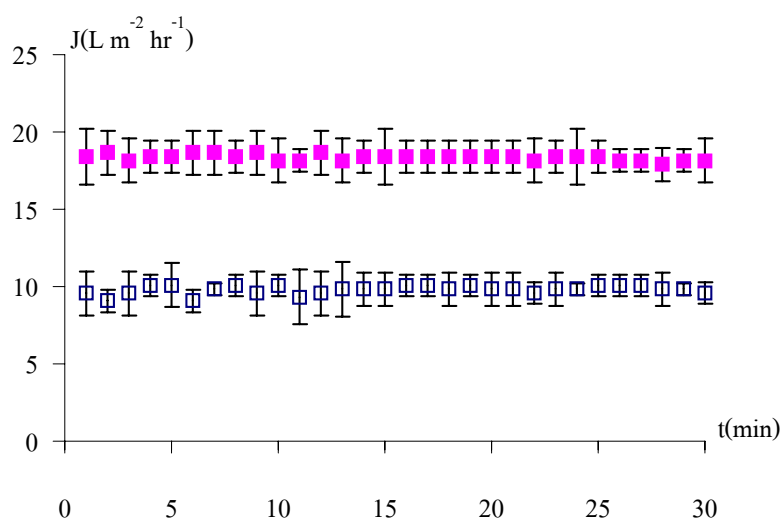
ความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์น้ำดี (J) กับความดัน (P) ซึ่งแสดงในภาพประกอบ 22 ให้ ความชันในหน่วย  $(L m^{-2} hr^{-1}) / (kPa)$  เปลี่ยนหน่วยเป็น  $m s^{-1} Pa^{-1}$  หรือ  $m^3 N^{-1} s^{-1}$  ซึ่งเป็นหน่วยของ ค่าสภาพการยอมให้น้ำผ่าน (Hydraulic permeability,  $L_p$ ) จึงคูณด้วยเฟกเตอร์  $2.77 \times 10^{-10}$  ผลการ คำนวณแสดงตาราง 4 จะเห็นว่าค่า  $L_p$  ของเยื่อบาง CH2PH มีค่าน้อยที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับค่า  $L_p$  ที่ได้ กับงานวิจัยอื่นดังแสดงในตาราง 2 จะเห็นว่าค่า  $L_p$  ของเยื่อบาง CH2PH อยู่ในกระบวนการกรอง ระดับ NF ส่วนค่า  $L_p$  ของเยื่อบาง CH25PEG และ CH28PEG อยู่ในกระบวนการกรองระดับ UF ดังนั้นจึงเลือกเยื่อบาง CH25PEG และ CH28PEG ทดสอบการกรองสารละลาย BSA และสารละลาย PEG เพื่อศึกษาค่ากักกันในหัวข้อถัดไป

ตาราง 4 ค่าสภาพการยอมให้น้ำผ่าน ( $L_p$ ) ของเยื่อบาง CH2PH, CH25PEG และ CH28PEG

เยื่อบาง	$L_p \times 10^{-11} (m^3 N^{-1} s^{-1})$
CH2PH	0.39
CH25PEG	3.65
CH28PEG	7.78

#### 4.1.4 การกรองสารละลาย BSA ของเยื่อบาง

เมื่อใช้สารละลาย BSA ความเข้มข้น 1 mg/ml เป็นสารป้อนที่ความดันคงที่ 100 kPa ผลดังภาพประกอบ 23 พบว่าเพอมีเอทที่ผ่านเยื่อบาง CH25PEG มีค่าต่ำกว่าเพอมีเอทของเยื่อบาง CH28PEG อย่างชัดเจนแสดงว่าความพรุนของเยื่อบาง CH25PEG น่าจะมีค่าน้อยกว่า ซึ่งสอดคล้องกับค่าฟลักซ์น้ำดี นอกจากนี้พบว่าเพอมีเอททั้งสองมีค่าคงที่ตลอดช่วงเวลา 30 นาทีของการกรอง และค่าเพอมีเอทของเยื่อบางทั้งสองมีค่าน้อยกว่าค่าของฟลักซ์น้ำดี (ภาพประกอบ 22) ดีความได้ว่าเยื่อบางทั้งสองมีการอุดตันเต็มที่ก่อน 1 นาทีแรกของการกรอง



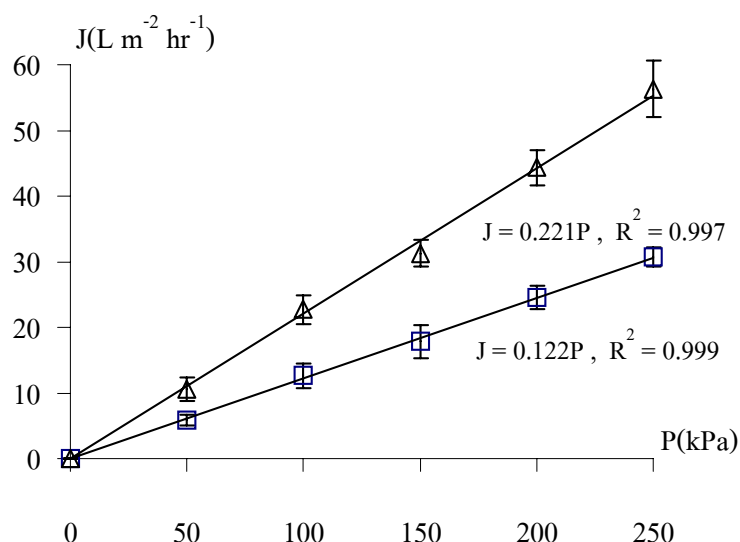
ภาพประกอบ 23 เพอมีเอทของสารละลาย BSA ผ่านเยื่อบาง CH25PEG (□) และ CH28PEG (■) เทียบกับเวลา ที่ความดัน 100 kPa

สำหรับค่าเปอร์เซ็นต์การกักกัน BSA ของเยื่อบางทั้งสอง จำนวนได้จากสมการ 7 ผลการคำนวณแสดงในตาราง 5 จะเห็นว่า ณ ช่วงเวลาการกรองเดียวกัน เยื่อบางทั้งสองสามารถกักกัน BSA ได้ใกล้เคียงกันและภายในเวลา 30 นาที เยื่อบางทั้งสองกักกัน BSA ได้ 100 % การที่เยื่อบางทั้งสองสามารถกักกัน BSA ได้พอๆ กัน แสดงว่าขนาดรูของเยื่อบางใกล้เคียงกันหรือ BSA มีขนาดใหญ่กว่ารูของเยื่อบางทั้งสอง

ตาราง 5 ค่าการกักกัน BSA ของเยื่อบาง CH25PEG และ CH28PEG เมื่อสิ้นสุดเวลาของการกรองต่างๆ กัน

t(min)	% Reject	
	CH25PEG	CH28PEG
5	98.6 ± 1.2	97.0 ± 1.8
15	99.7 ± 0.4	99.6 ± 0.5
30	100.0 ± 0.0	100.0 ± 0.0

หลังจากการกรองสารละลาย BSA แล้วนำเยื่อบางล้างน้ำกลั่นตามวิธีการในข้อ 3.4.3 และทดสอบฟลักซ์น้ำอีกครั้ง ผลการวัดฟลักซ์แสดงในภาพประกอบ 24 จะเห็นว่าเยื่อบาง CH28PEG มีค่าฟลักซ์น้ำดีสูงกว่าเยื่อบาง CH25PEG ทุกความดัน ซึ่งจะนำความชันของกราฟนี้ไปคำนวณหาค่าความต้านทานเนื่องจากอุดตัน ( $R_p$ ) ของ BSA ในหัวข้อ 4.1.5

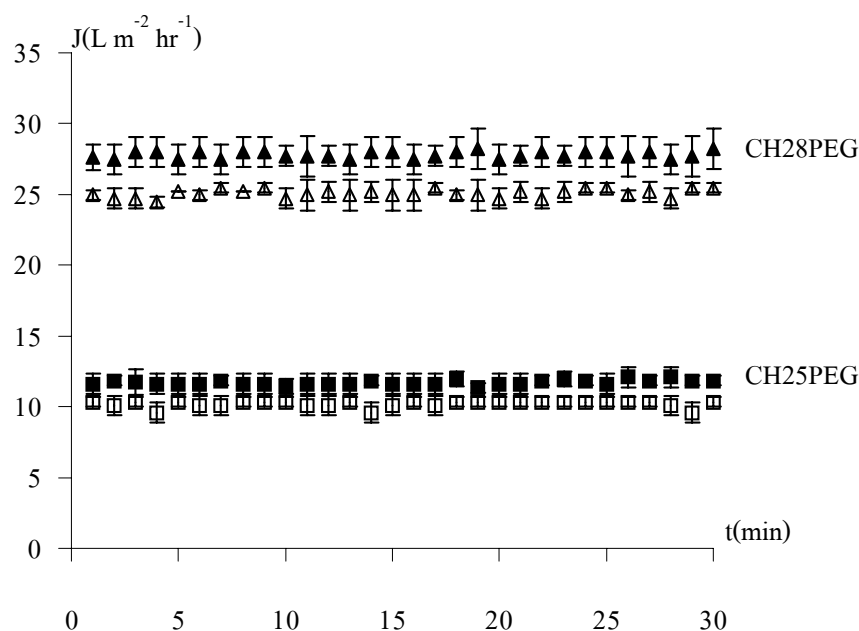


ภาพประกอบ 24 ฟลักซ์น้ำดีหลังการกรองสารละลาย BSA ของเยื่อบาง CH25PEG (□) และ CH28PEG (Δ)

#### 4.1.4 การกรองสารละลาย PEG ของเยื่อบาง

เมื่อป้อนสารละลาย PEG ที่มีน้ำหนักโมเลกุล 10,000 Da และ 35,000 Da ความเข้มข้น 50 ppm. ภายใต้ความดันคงที่ 100 kPa ภาพประกอบ 25 จะเห็นว่าเพอมีเททของเยื่อบาง CH25PEG มีค่าน้อยกว่าเยื่อบาง CH28PEG อย่างชัดเจน และมีค่าคงที่ทำงานองเดียวกันกับการกรอง BSA แต่เพอมีเททของสารละลาย PEG ที่มีน้ำหนักโมเลกุล 10,000 Da มีค่าสูงกว่าของสารละลาย PEG ที่มีน้ำหนักโมเลกุล 35,000 Da แสดงว่า PEG ที่มีน้ำหนักโมเลกุลน้อยกว่ายอมผ่านเยื่อบางได้มากกว่าหรือถูก

กักกันได้น้อยกว่า ทั้งนี้ผลดังที่กล่าวมีความชัดเจนในเยื่อบาง CH28PEG มากกว่าเยื่อบาง CH25PEG และค่าพอมิเอทของสารละลายขณะกรองจะนำไปคำนวณหาค่าความต้านทาน  $R_p$  ในหัวข้อ 4.1.5



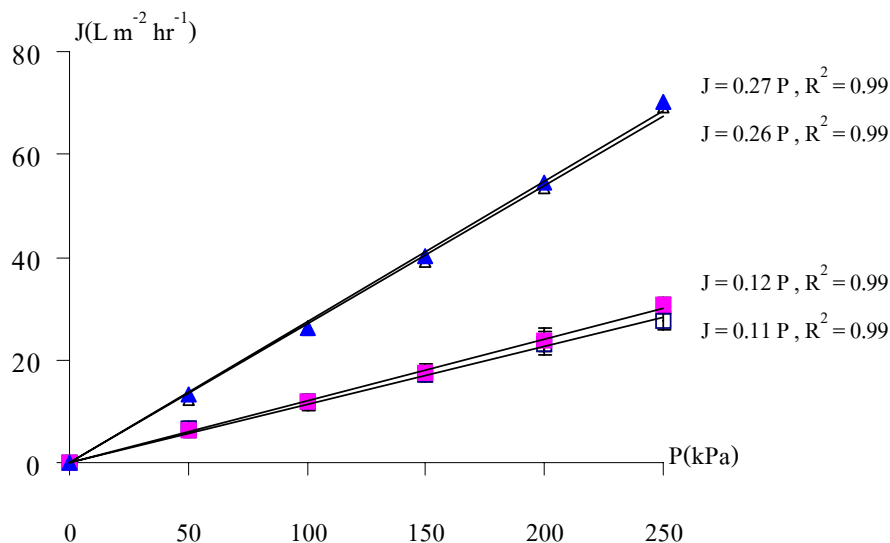
ภาพประกอบ 25 พอมิเอทของสารละลาย PEG MWCO 10,000 Da (■, ▲) และ 35,000 Da (□, △) ของเยื่อบาง CH25PEG และ CH28PEG เทียบกับเวลาการกรอง ที่ความดัน 100 kPa

เปอร์เซ็นต์การกักกัน PEG จำนวนทำนองเดียวกันการหาค่ากักกัน BSA โดยใช้กราฟมาตรฐาน (ภาคผนวก 3) ผลการคำนวณแสดงในตาราง 6 จะเห็นว่า เยื่อบาง CH25PEG และ CH28PEG สามารถกักกัน PEG ได้เพิ่มขึ้นตามเวลาของการกรองและเมื่อสิ้นสุดเวลาที่ 30 เยื่อบาง CH28PEG สามารถกักกัน PEG ได้น้อยกว่าเยื่อบาง CH25PEG อาจเนื่องจากมีรูขนาดใหญ่กว่าเยื่อบาง CH25PEG สมมติฐานนี้ศึกษาได้จากภาพถ่าย SEM ในหัวข้อ 4.1.7

ตาราง 6 แสดงค่าการกักกันของ PEG กับเวลาการกรองของเยื่อบาง CH25PEG และ CH28PEG

t(min)	%Reject			
	CH25PEG		CH28PEG	
	PEG10,000	PEG 35,000	PEG10,000	PEG 35,000
5	85.4 ± 2.3	89.7 ± 1.6	85.5 ± 3.9	88.3 ± 2.3
15	86.8 ± 2.0	93.51 ± 0.9	85.7 ± 1.8	89.8 ± 1.6
30	92.5 ± 3.2	96.4 ± 1.4	87.0 ± 2.3	93.8 ± 0.5

หลังจากทดสอบการกรองสารละลาย PEG แล้วนำเยื่อบางล้างด้วยน้ำกลั่นตามวิธีการในข้อ 3.4.3 และวัดฟลักซ์น้ำดีอีกครั้ง ภาพประกอบ 26 แสดงฟลักซ์น้ำดีหลังกรองสารละลาย PEG จะเห็นว่าฟลักซ์น้ำดีของเยื่อบางทั้งสองหลังการกรองสารละลาย PEG ที่มีน้ำหนักโมเลกุล 10,000 Da และ 35,000 Da มีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งจะนำความชันของกราฟนี้ไปคำนวณหาค่าความต้านทานเนื่องจากการอุดตัน ( $R_p$ ) ของ PEG ในหัวข้อ 4.1.5



ภาพประกอบ 26 ฟลักซ์น้ำดีหลังกรองสารละลาย PEG ของเยื่อบาง CH25PEG (■ PEG 10,000 Da □ PEG 35,000 Da) และ CH28PEG (▲ PEG 10,000 Da △ PEG 35,000 Da)

#### 4.1.5 ความต้านทานการไหลของเยื่อบาง ( $R_m$ , $R_f$ และ $R_p$ )

เนื่องจากการหาค่าความต้านทานการไหลของเยื่อบาง จะต้องวัดความหนืดของสารละลายที่เพอมีเอทผ่านเยื่อบางซึ่งนำค่าความหนืดนี้มาคำนวณค่า  $R_m$ ,  $R_f$  และ  $R_c$  ตาราง 7 แสดงความหนืดของน้ำกลั่น สารละลาย BSA และ PEG ซึ่งเป็นสารป้อนจะเห็นว่าความหนืดของสารละลาย BSA และ PEG มีค่าใกล้เคียงกับความหนืดของน้ำ ดังนั้นความหนืดของสารละลายที่เพอมีเอทจึงใช้ค่าความหนืดของน้ำแทนในการคำนวณหาค่าความต้านทาน  $R_f$  และ  $R_p$

ตาราง 7 ความหนืดของน้ำกลั่น สารละลาย BSA และสารละลาย PEG

สารละลาย	D (kg*m <sup>-3</sup> )	t <sub>average</sub> (s)	$\eta$ (x 10 <sup>-4</sup> Pa*s)
น้ำกลั่น	1,000.67 ± 4.79	78	8.48 ± 0.04
BSA 1 mg/ml	1,001.67 ± 6.92	76	8.62 ± 0.03
PEG 50 ppm.	1,001.97 ± 3.75	77	8.38 ± 0.06

ความต้านทาน  $R_m$  สามารถคำนวณได้จากสมการ 2 โดยอาศัยความชันจากความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์น้ำดีกับความดันในภาพประกอบ 22 (ตัวอย่างการคำนวณสามารถดูได้จากภาคผนวก 4 ) ผลการคำนวณแสดงในตาราง 8 จะเห็นว่า  $R_m$  ของเยื่อบาง CH2PH มีค่าสูงกว่าเยื่อบาง CH25PEG และ CH28PEG แสดงว่าเยื่อบางที่ให้ผ่านน้ำได้ดีกว่าย่อมมีค่า  $R_m$  ต่ำกว่า

ตาราง 8 ค่าความต้านทานการไหล  $R_m$  ของเยื่อบาง CH2PH , CH25PEG และ CH28PEG

เยื่อบาง	$R_m$ ( $\times 10^{13} \text{ m}^{-1}$ )
CH2PH	6.01
CH25PEG	3.22
CH28PEG	1.51

ความต้านทานของเยื่อบางจากการอุดตันภายในรูพรุน ( $R_p$ ) สามารถคำนวณได้จากสมการ 5 ซึ่งนำเยื่อบางทั้งสองที่ผ่านการกรอง BSA และ PEG ล้างด้วยน้ำกลั่นแล้ววัดฟลักซ์น้ำดี โดยอาศัยจากความชันกราฟของฟลักซ์น้ำดีเทียบกับความดัน จากภาพประกอบ 24 และ 26 ใช้ในการคำนวณ ผลการคำนวณค่า  $R_p$  จะแสดงพร้อมกับค่า  $R_f$  ในตาราง 9

ความต้านทานเนื่องจากการอุดตันของอนุภาคที่ผิวเยื่อบาง  $R_p$  สามารถคำนวณได้จากสมการ 6 โดยอาศัยภาพประกอบ 23 เพอมิเอทของสารละลาย BSA ผ่านเยื่อบาง CH25PEG และ CH28PEG มีค่าเท่ากับ  $10.08 \pm 0.71$  และ  $18.40 \pm 1.07 \text{ L m}^{-2} \text{ hr}^{-1}$  ตามลำดับ และจากภาพประกอบ 25 เพอมิเอทของสารละลาย PEG ที่มีน้ำหนักโมเลกุล 10,000 Da ผ่านเยื่อบาง CH25PEG และ CH28PEG มีค่าเท่ากับ  $11.60 \pm 0.71$  และ  $26.70 \pm 1.07 \text{ L m}^{-2} \text{ hr}^{-1}$  ตามลำดับ และเพอมิเอทของสารละลาย PEG ที่มีน้ำหนักโมเลกุล 35,000 Da ผ่านเยื่อบาง CH25PEG และ CH28PEG มีค่าเท่ากับ  $10.34 \pm 0.36$  และ  $25.46 \pm 0.36 \text{ L m}^{-2} \text{ hr}^{-1}$  ตามลำดับ ซึ่งนำหาเพอมิเอทนี้คำนวณหาค่า  $R_p$

ผลจากการคำนวณหาค่า  $R_f$  และ  $R_p$  แสดงในตาราง 9 จะเห็นว่าค่า  $R_f$  ของการกรอง BSA ของเยื่อบาง CH25PEG มีค่าต่ำกว่า CH28PEG ทั้ง ๆ ที่เยื่อบางทั้งสองสามารถกักกัน BSA ได้ใกล้เคียงกัน ซึ่งอาจจะเป็นไปได้ว่าเยื่อบาง CH25PEG มีจำนวนรูน้อยกว่าหรือมีขนาดรูเล็กกว่าเยื่อบาง CH28PEG และค่า  $R_p$  ของเยื่อบาง CH25PEG มีค่าสูงกว่าเยื่อบาง CH28PEG หากสมมติฐานเรื่องจำนวนรูน้อยกว่าหรือขนาดรูเล็กกว่าเป็นจริงจะทำให้เกิดการอุดตันที่ผิวหน้าเยื่อบางสูง ส่วนค่า  $R_f$  และ  $R_p$  ของเยื่อบาง CH25PEG และ CH28PEG จากการกรองสารละลาย PEG จะเห็นว่าเยื่อบาง CH25PEG มีค่า  $R_f$  และ  $R_p$  สูงกว่าเยื่อบาง CH28PEG โดยค่า  $R_f$  และ  $R_p$  ของการกรองสารละลาย PEG ที่มีน้ำหนักโมเลกุล 35,000 Da มีค่าสูงกว่าเมื่อเทียบกับการกรองสารละลาย PEG ที่มีน้ำหนัก



โมเลกุล 10,000 Da ซึ่งค่าความต้านทานนี้สอดคล้องกับค่าการกักกันสารละลาย PEG (จากตาราง 6) โดยค่าความต้านทาน  $R_f$  และ  $R_p$  สูงจะส่งผลให้ความสามารถในการกักกัน PEG ได้สูง

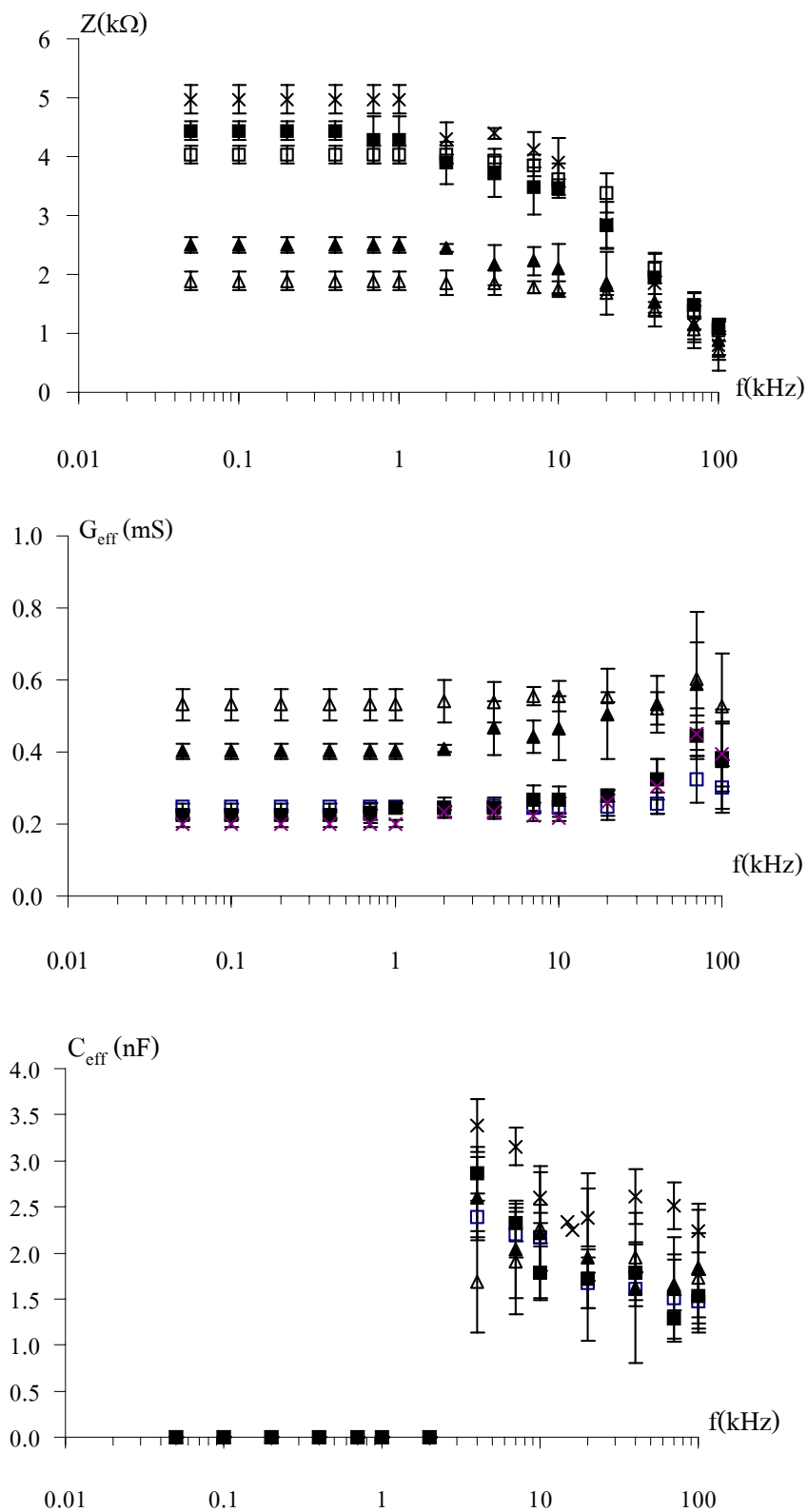
ตาราง 9 ความต้านทานการไหล  $R_f$  และ  $R_p$  ของเยื่อบาง CH25PEG และ CH28PEG หลังกรองสารละลาย BSA และ PEG

R ( $\times 10^{13} \text{ m}^{-1}$ )	CH25PEG			CH28PEG		
	กรอง PEG MW 10,000	กรอง PEG MW 35,000	กรอง BSA MW 67,000	กรอง PEG MW 10,000	กรอง PEG MW 35,000	กรอง BSA MW 67,000
$R_f$	0.32	0.64	0.27	0.06	0.12	0.41
$R_p$	0.13	0.25	0.73	0.02	0.03	0.38

#### 4.1.6 สมบัติทางไฟฟ้าของเยื่อบาง CH2D , CH25PEG และ CH28PEG

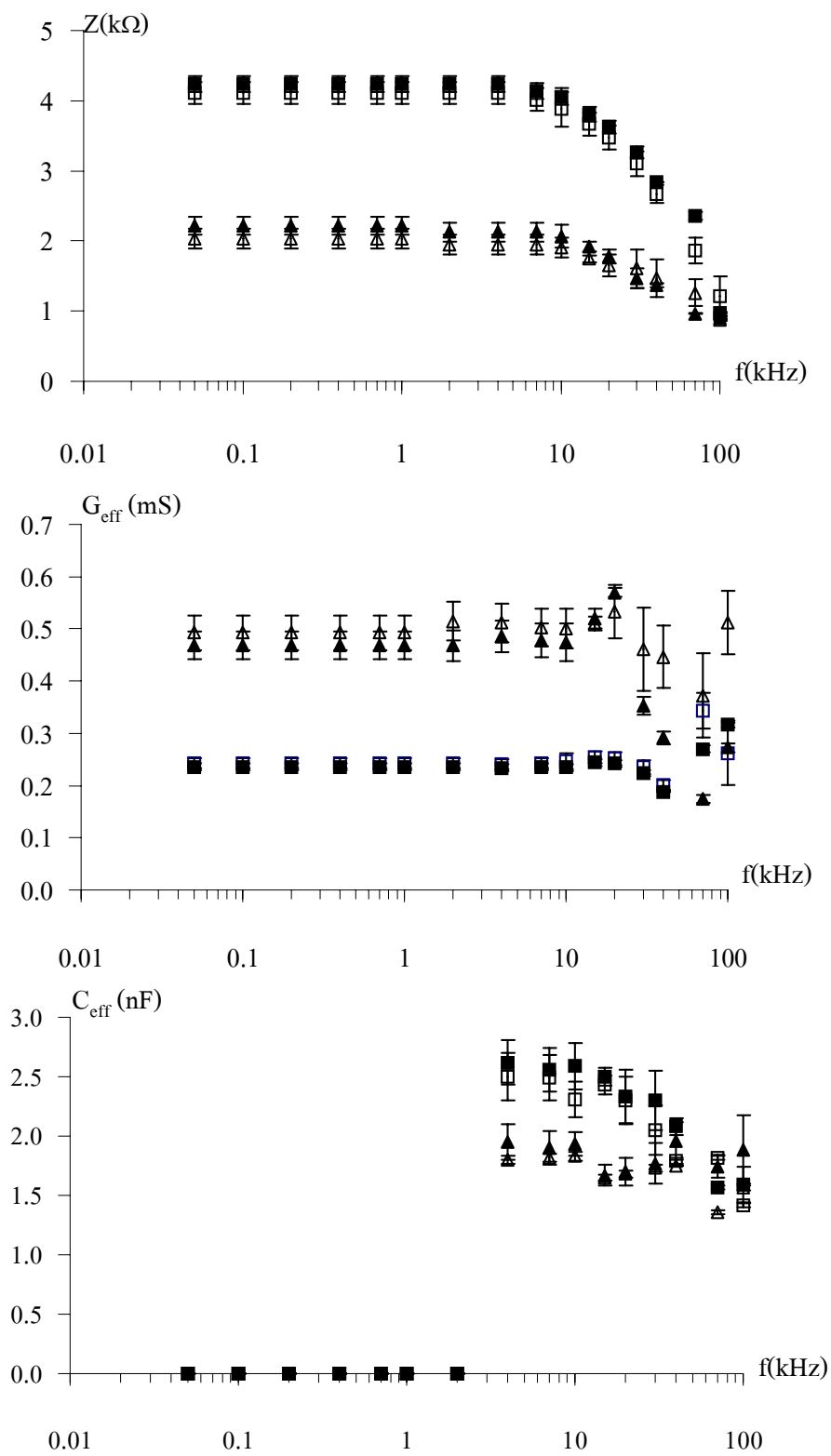
เนื่องจากเยื่อบางที่เตรียมเป็นแบบแน่น (CH2D) และมีรูพรุน (CH25PEG, CH28PEG) การทดลองนี้เพื่อศึกษาการสมบัติทางไฟฟ้าของเยื่อบางแต่ละชนิดและเปรียบเทียบเยื่อบางที่สะอาดและเยื่อบางที่ใช้กรองสารละลายแล้ว โดยตรงเยื่อบางในอุปกรณ์ดังบรรยายในหัวข้อ 3.4.5 ผลการศึกษาแสดงในภาพประกอบ 27 จะเห็นว่าค่าอิมพีแดนซ์ ( $Z$ ) ของเยื่อบาง CH2D ซึ่งเป็นเนื้อแน่นระหว่างความถี่ 50 Hz – 1kHz. มีค่า  $Z$  สูงสุด ส่วนเยื่อบาง CH25PEG มีค่า  $Z$  สูงกว่าเยื่อบาง CH28PEG ติความได้ว่าเยื่อบาง CH28PEG น่าจะมีขนาดรูใหญ่กว่าหรือความพรุนมากกว่า หลังจากการกรอง BSA นาน 30 นาที นำเยื่อบางไปล้างด้วยน้ำกลั่น แล้วนำไปวัดสมบัติทางไฟฟ้าพบว่าค่า  $Z$  หลังการกรอง BSA ของเยื่อบาง CH25PEG มีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 9% คือเพิ่มจาก 4.04 k $\Omega$  เป็น 4.44 k $\Omega$  และเยื่อบาง CH28PEG ค่า  $Z$  เพิ่มขึ้นเป็น 31% คือเพิ่มจาก 1.89 k $\Omega$  เป็น 2.49 k $\Omega$  จากข้อมูลที่ได้จึงอธิบายว่า BSA อุดภายในรูพรุนของเยื่อบาง CH28PEG ได้มากกว่าเยื่อบาง CH25PEG ซึ่งสอดคล้องกับเรื่องขนาดรูและความพรุนของเยื่อบางจากผลของฟลักซ์น้ำดี (ข้อ 4.1.3) และค่าความต้านทานการไหลเนื่องจากการอุดตันในรูพรุน ( $R_p$ ) ในตาราง 5 ส่วนค่า  $Z$  ของเยื่อบางทั้งสามชนิด ในช่วงความถี่สูงขึ้นมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องซึ่งการลดลงนี้เป็นไปตามทฤษฎี (สมการ 11)

ผลของความนำไฟฟ้า ( $G_{eff}$ ) ของเยื่อบาง CH28PEG ในช่วงความถี่ 50 Hz - 100 kHz มีค่าสูงกว่าเยื่อบาง CH25PEG และเยื่อบาง CH2D ตามลำดับ ซึ่งให้เห็นว่าเยื่อบางที่มีขนาดรูหรือความพรุนมากกว่าจะมีค่าความนำไฟฟ้าได้ดีกว่า และหลังจากอุดตันด้วย BSA ค่าความนำไฟฟ้าของเยื่อบาง CH25PEG และ CH28PEG มีค่าลดลงจากเดิม ส่วนความจุไฟฟ้า ( $C_{eff}$ ) ของเยื่อบาง ในช่วงความถี่ 50 Hz – 2 kHz มีค่าเป็นศูนย์ เนื่องจากผลต่างมุมเฟสระหว่างกระแสของวงจรกับกระแสที่ผ่านเยื่อบางมีค่าเท่ากับศูนย์และที่ความถี่ 4 kHz ค่า  $C_{eff}$  ของเยื่อบาง CH2D มีค่าสูงกว่าเยื่อบาง CH25PEG และ CH28PEG ตามลำดับ หลังจากกรองสารละลาย BSA ค่า  $C_{eff}$  ของเยื่อบาง CH25PEG และ CH28PEG เพิ่มขึ้นจากค่าเดิม จึงเป็นไปได้ว่า BSA อุดตันภายในรูเยื่อบาง ทำให้เกิดการออกของประจุที่ผิวหน้าของเยื่อบางในสารละลายอิเล็กโตรไลต์เพิ่มขึ้น



ภาพประกอบ 27 ค่า  $Z$ ,  $G_{\text{eff}}$ ,  $C_{\text{eff}}$  กับความถี่ ของเยื่อบาง CH2D (X), ก่อนกรอง BSA ของเยื่อบาง CH25PEG (□), CH28PEG (Δ) และหลังกรอง BSA ของเยื่อบาง CH25PEG (■), CH28PEG (▲)

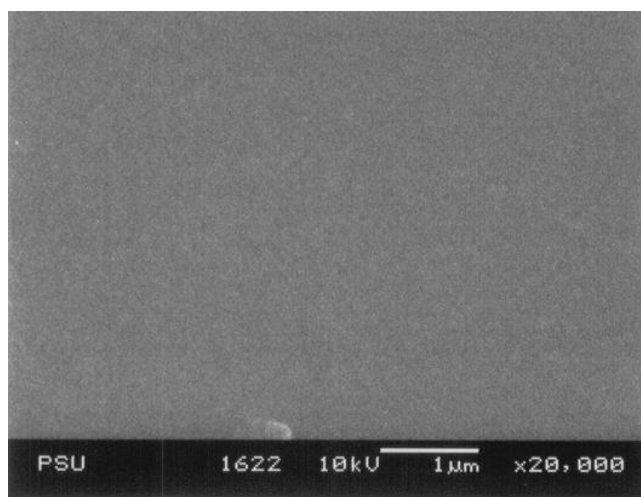
ส่วนคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเยื่อบาง CH25PEG และ CH28PEG หลังจากการกรองสารละลาย PEG แสดงในภาพประกอบ 28 จะเห็นว่าในระหว่างความถี่ 50 Hz – 1 kHz เยื่อบางทั้งสองชนิด หลังจากการกรอง PEG ที่มีน้ำหนักโมเลกุล 35,000 Da มีค่า Z สูงกว่าการกรอง PEG ที่มีน้ำหนักโมเลกุล 10,000 Da เล็กน้อย สอดคล้องกับค่าการกักกัน PEG โดยเยื่อบางทั้งสองสามารถกักกัน PEG ที่มีน้ำหนักโมเลกุล 35,000 Da ได้สูงกว่า PEG ที่มีน้ำหนักโมเลกุล 10,000 Da เล็กน้อย (ตาราง 6) ส่วนค่า  $G_{\text{eff}}$  ของเยื่อบาง CH25PEG และ CH28PEG หลังจากการกรองสารละลาย PEG ที่มีน้ำหนักโมเลกุล 10,000 Da และ 35,000 Da มีค่า  $G_{\text{eff}}$  ใกล้เคียงกัน และค่า  $C_{\text{eff}}$  ของเยื่อบางทั้งสองหลังการกรองสารละลาย PEG มีค่าเพิ่มขึ้นจากค่าเดิม โดยการกรองสารละลาย PEG ที่มีน้ำหนักโมเลกุล 35,000 Da มีค่าสูงกว่าการกรองสารละลาย PEG ที่มีน้ำหนักโมเลกุล 10,000 Da



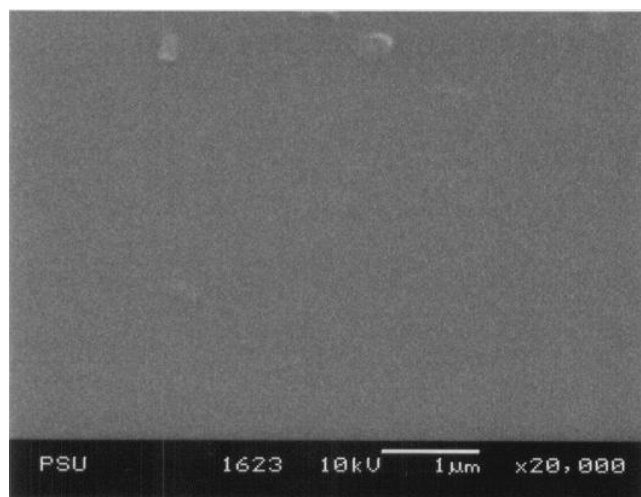
ภาพประกอบ 28 ค่า  $Z$ ,  $G_{\text{eff}}$ ,  $C_{\text{eff}}$  กับความถี่ หลังจากการกรองสารละลาย PEG ของเชื่อบาง CH25PEG ( $\square$  MW 10,000 และ  $\blacksquare$  MW 35,000) และเชื่อบาง CH28PEG ( $\triangle$  MW 10,000 และ  $\blacktriangle$  MW 35,000)

#### 4.1.7 ภาพถ่ายเยื่อบางจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

ภาพประกอบ 29 แสดงภาพถ่าย SEM ของเยื่อบาง CH2D ซึ่งเตรียมโดยวิธีอบแห้ง จะเห็นว่าผิวด้านหน้าและด้านหลังของเยื่อบางมีลักษณะผิวราบเรียบเหมือนกันและไม่เห็นรูพรุนที่ กำลังขยาย 20,000 เท่า แสดงว่าเยื่อบาง CH2D เป็นแบบเนื้อแน่นหรือไม่มีรูพรุนซึ่งผลสอดคล้องกับผลการทดสอบฟลักซ์น้ำดีในหัวข้อ 4.1.3 และผลการวัดอิมพีแดนซ์มีค่ามากที่สุด ในหัวข้อ 4.1.6



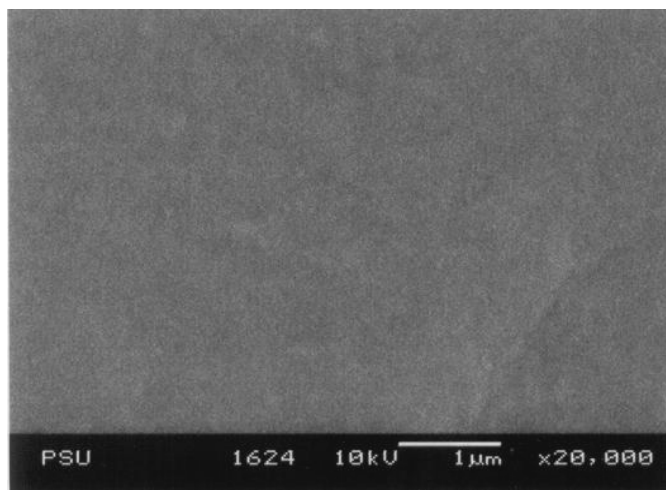
(a) ด้านหน้า



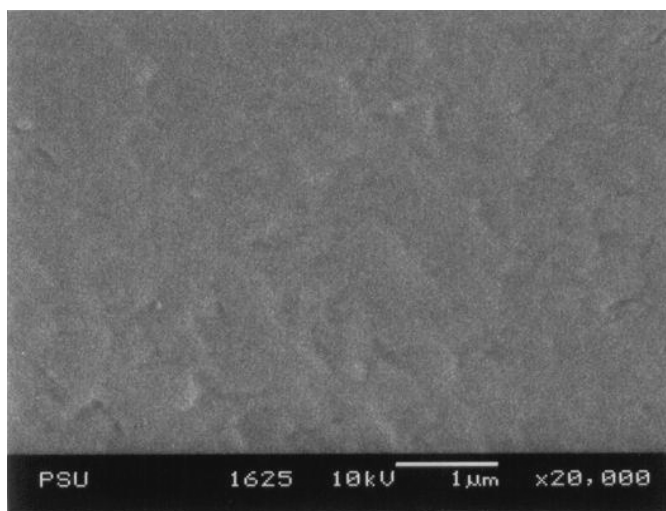
(b) ด้านหลัง

ภาพประกอบ 29 ภาพถ่าย SEM ของเยื่อบาง CH2D

ภาพประกอบ 30 แสดงภาพถ่าย SEM ของเยื่อบาง CH2PH ซึ่งเตรียมโดยวิธีแบบเปลี่ยนเฟสจะเห็นว่าลักษณะผิวด้านหน้าและด้านหลังของเยื่อบางมีลักษณะขรุขระและเยื่อบางไม่เห็นรูพรุนที่กำลังขยาย 20,000 เท่า แต่เยื่อบางนี้ยอมให้น้ำผ่านได้โดยค่า  $L_p$  อยู่ในระดับ NF (ผลข้อ 4.1.3) แสดงว่าเยื่อบางนี้อาจจะมีขนาดรูเล็กมากหรือมีจำนวนรูน้อย



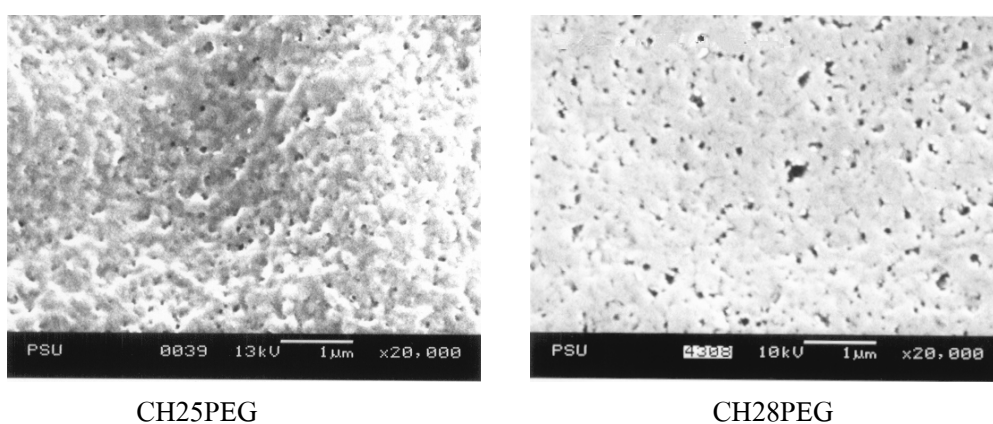
(a) ด้านหน้า



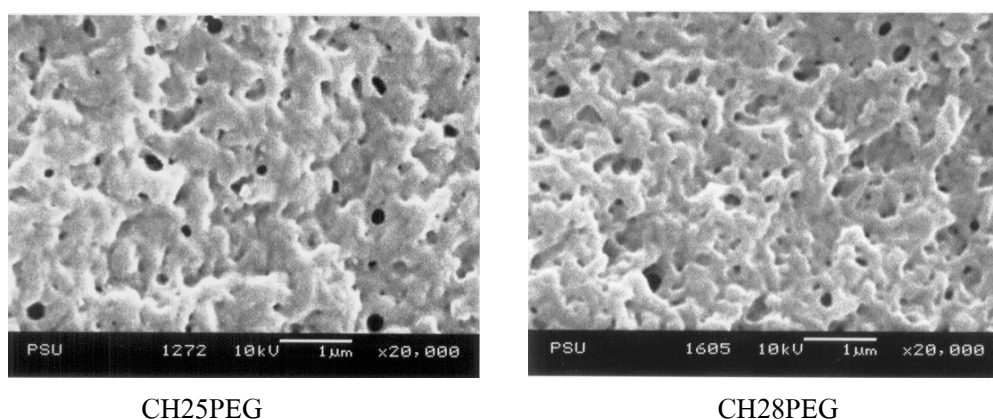
(b) ด้านหลัง

ภาพประกอบ 30 ภาพถ่าย SEM ของเยื่อบาง CH2PH

จากภาพประกอบ 31 แสดงภาพถ่าย SEM ของเยื่อบาง CH25PEG และ CH28PEG ที่กำลังขยาย 20,000 เท่า จะเห็นว่าเยื่อบาง CH28PEG มีความพรุนมากกว่า เยื่อบาง CH25PEG และจากการใช้โปรแกรมคาร์นอยด์วิเคราะห์หาขนาดรูและคำนวณความพรุนด้านหน้าของเยื่อบาง ผลแสดงในภาพประกอบ 32 พบว่าเยื่อบาง CH25PEG มีขนาดรูเฉลี่ย  $0.046 \pm 0.021$  ไมครอน ความพรุน 0.45 % และ เยื่อบาง CH28PEG มีขนาดรูเฉลี่ย  $0.080 \pm 0.034$  ไมครอน ความพรุน 2.15 % แสดงว่าการที่เยื่อบาง CH28PEG มีฟลักซ์น้ำดีสูงกว่าเยื่อบาง CH25PEG (ผลข้อ 4.1.3) ทั้งนี้เนื่องจากการที่เยื่อบาง CH28PEG มีขนาดรูและความพรุนสูงกว่า และจะให้อิมพีแดนซ์ (Z) มีค่าต่ำกว่าด้วย



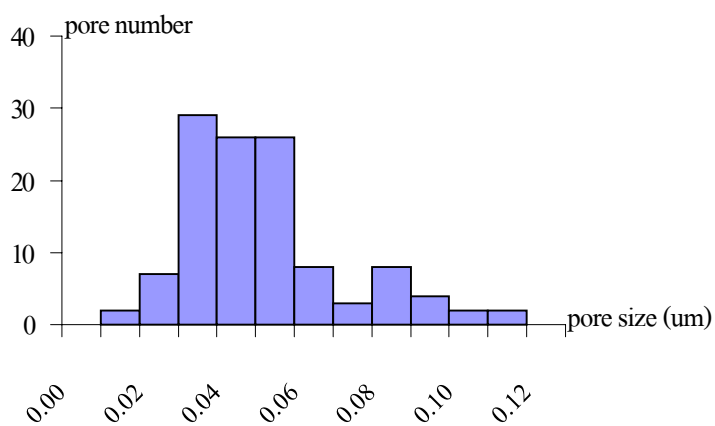
(a) ด้านหน้า



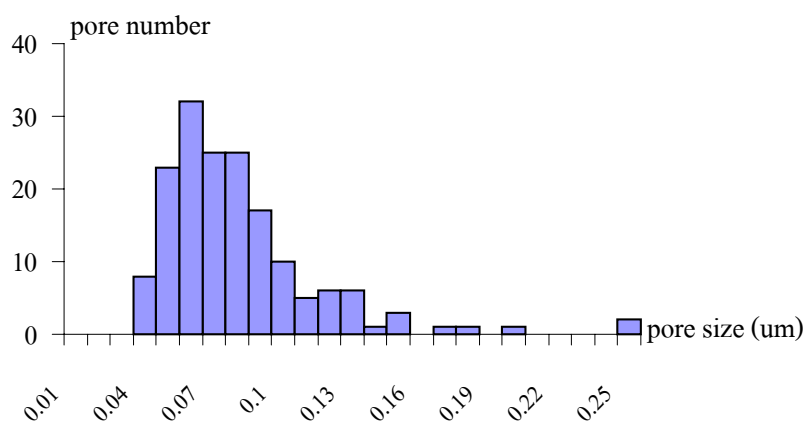
(b) ด้านหลัง

ภาพประกอบ 31 ภาพถ่าย SEM ของเยื่อบาง CH25PEG และ CH28PEG





(a) เยื่อบาง CH25PEG ขนาดรูเฉลี่ย  $0.046 \pm 0.021$  ไมครอน ความพรุน 0.45%



(b) เยื่อบาง CH28PEG ขนาดรูเฉลี่ย  $0.080 \pm 0.034$  ไมครอน ความพรุน 2.15%

ภาพประกอบ 32 จำนวนรูและขนาดรูของเยื่อบาง CH25PEG และ CH28PEG ต่อพื้นที่เยื่อบาง  $32.69 \mu\text{m}^2$

การเตรียมตัวอย่างสำหรับดูขนาดรูของเยื่อบางจะต้องเป็นตัวอย่างที่แห้ง แต่เนื่องจากหลังจากทดสอบการกรองแล้วเมื่อบางเยื่อบางทิ้งไว้ให้แห้งเยื่อบางหดซึ่งจะทำให้ขนาดรูเปลี่ยนแปลงไป ดังนั้นจึงวัด ค่า  $Z$ ,  $G_{\text{eff}}$  และ  $C_{\text{eff}}$

## 4.2 การทดสอบเยื่อบาง PES เยื่อประกอบ PES/CH2P และ PES/CH25PEG

### 4.2.1 ความหนาและสีของเยื่อบาง

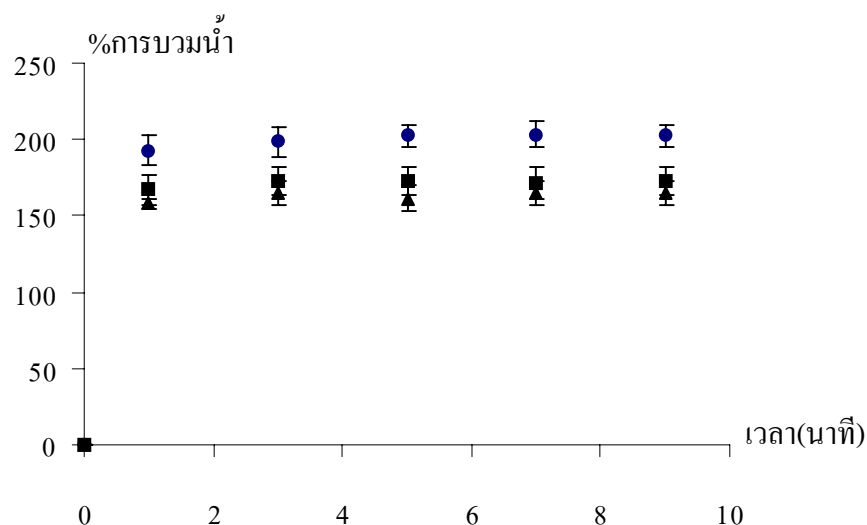
เยื่อประกอบเตรียมโดยวิธีในข้อ 3.3.1 และ 3.3.2 คือ เยื่อประกอบ PES/CH2P และเยื่อประกอบ PES/CH25PEG ตาราง 10 แสดงให้เห็นว่าเยื่อฐาน PES กับเยื่อประกอบชนิด PES/CH2P และ PES/CH25PEG มีความหนาใกล้เคียงกัน ส่วนสีที่ผิวหน้าของเยื่อประกอบ PES/CH25PEG มีความเงาวาวมากกว่าเยื่อบาง PES/CH2P ทั้งนี้เนื่องจากไคโตซานเคลือบติดที่ผิวหน้ามากกว่า

ตาราง 10 แสดงคุณสมบัติทางกายภาพของเยื่อบาง PES เยื่อประกอบ PES/CH2P และ PES/CH25PEG

เยื่อบาง, เยื่อประกอบ	วิธีการเตรียม	ความหนา ( $\mu\text{m}$ )	ลักษณะของสี
PES	เยื่อฐานทางการค้า	$162.20 \pm 0.45$	สีขาว
PES/CH2P	แบบอัดความดัน	$162.00 \pm 1.03$	สีขาว ด้านหน้าเงาวาวเล็กน้อย
PES/CH25PEG	แบบรีดบนผิวหน้า	$162.15 \pm 2.95$	สีขาว ด้านหน้าเงาวาวมาก

### 4.2.2 การบวมน้ำของเยื่อบาง

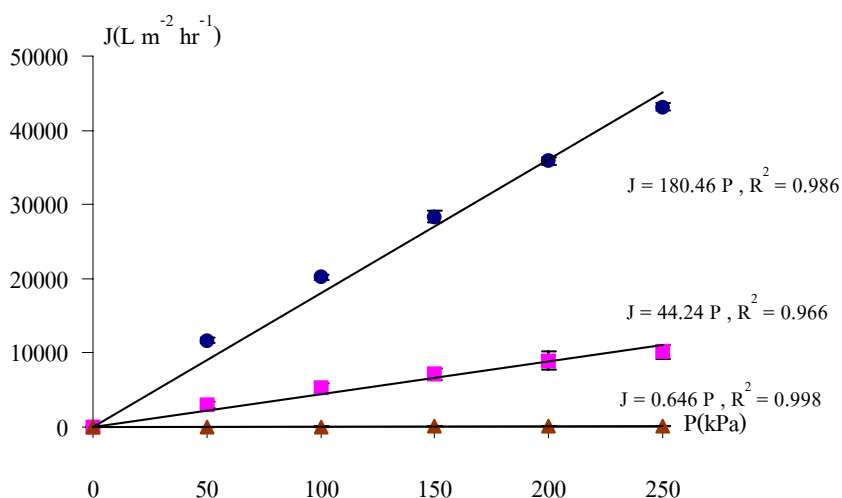
ภาพประกอบ 33 แสดงเปอร์เซ็นต์การบวมน้ำของเยื่อบางเทียบกับเวลา จะเห็นว่าเยื่อบาง PES, PES/CH2P และ PES/CH25PEG สามารถดูดซับน้ำอิ่มตัวภายใน 1 นาทีแรกของการแช่เยื่อบางในน้ำ โดยเยื่อประกอบ PES/CH2P และ PES/CH25PEG มีการบวมน้ำน้อยกว่าเยื่อบาง PES จากการศึกษานี้ในข้อ 4.1.2 พบว่าเยื่อบางไคโตซานบวมน้ำน้อยกว่าเยื่อบาง PES แสดงว่าไคโตซานที่เคลือบบนผิวช่วยปิดกั้นการบวมน้ำของเยื่อฐาน PES



ภาพประกอบ 33 เปอร์เซ็นต์การบวมน้ำของเยื่อบาง PES (●), PES/CH2P (■), PES/CH25PEG (▲)

### 4.2.3 ฟลักซ์น้ำดี

ภาพประกอบ 34 แสดงฟลักซ์น้ำดีผ่านเยื่อบาง PES เยื่อประกอบ PES/CH2P และ PES/CH25PEG เทียบกับความดัน จะเห็นได้ว่าฟลักซ์น้ำดีของเยื่อบาง PES มีค่าสูงสุดที่ทุกๆ ความดันระหว่าง 50 - 250 kPa และฟลักซ์น้ำดีของเยื่อประกอบ PES/CH2P มีค่าสูงกว่าฟลักซ์น้ำดีของเยื่อประกอบ PES/CH25PEG ที่ทุกความดันเช่นกัน ซึ่งสามารถตีความได้ว่าการเตรียมโพลีโธซานโดยวิธีอัดความดันน่าจะให้ขนาดรูใหญ่กว่าวิธีการเตรียมรีดบนผิวหน้าเยื่อฐาน



ภาพประกอบ 34 ฟลักซ์น้ำดีผ่านเยื่อบาง PES (●) เยื่อประกอบ PES/CH2P (■) และ PES/CH25PEG (▲) เทียบกับความดัน

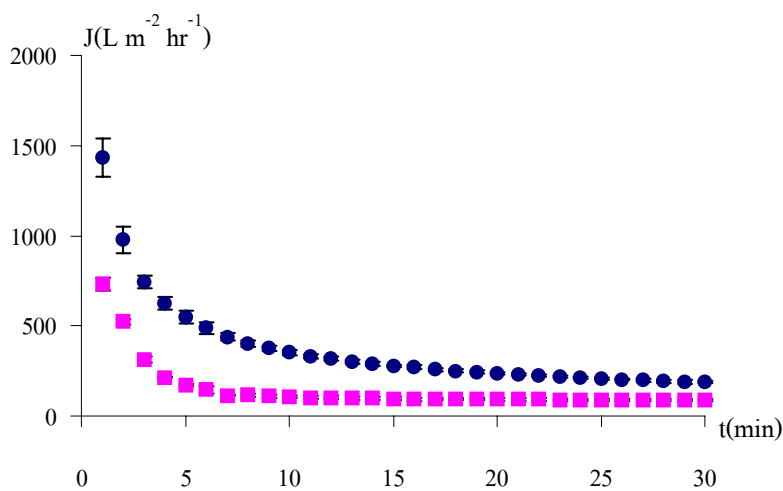
ส่วนความชันของกราฟซึ่งแสดงในภาพประกอบ 34 นำไปคำนวณหาค่าสภาพยอมให้น้ำผ่าน (Hydraulic permeability,  $L_p$ ) ทำนองเดียวกันกับวิธีการในหัวข้อ 4.1.3 ผลการคำนวณแสดงในตาราง 11 เมื่อเปรียบเทียบค่า  $L_p$  ที่ได้กับงานวิจัยอื่น (ตาราง 2) จะเห็นว่าค่า  $L_p$  ของเยื่อบาง PES และเยื่อประกอบ PES/CH2P จัดอยู่ในกระบวนการกรองระดับ MF ส่วนค่า  $L_p$  ของเยื่อประกอบ PES/CH25PEG จัดอยู่ในกระบวนการกรองระดับ UF ซึ่งจะทดสอบการกรองสารละลาย BSA และ PEG ด้วยเยื่อบางทั้งสามชนิดในหัวข้อถัดไป

ตาราง 11 สภาพยอมให้น้ำผ่าน ( $L_p$ ) ของเยื่อบาง PES เยื่อประกอบ PES/CH2P และ PES/CH25PEG

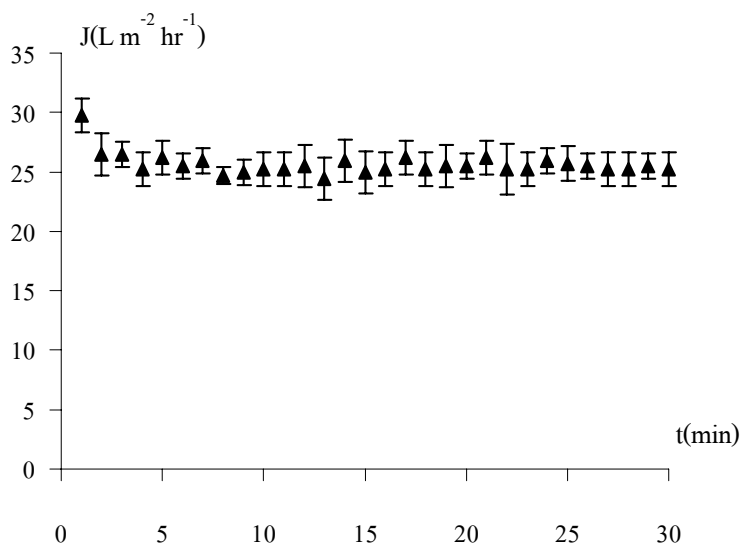
ชนิดของเยื่อบาง	$L_p$ (m s <sup>-1</sup> Pa <sup>-1</sup> )
PES	$4.99 \times 10^{-8}$
PES/CH2P	$1.22 \times 10^{-8}$
PES/CH25PEG	$1.78 \times 10^{-10}$

#### 4.2.4 การกรองสารละลาย BSA ของเยื่อบาง

ใช้สารละลาย BSA ความเข้มข้น 1 mg/ml เป็นสารป้อนที่ความดันคงที่ 100 kPa ให้แก่เยื่อบางทั้งสามชนิด ภาพประกอบ 35 (a และ b) จะเห็นว่าเพอมีเอทของสารละลาย BSA ผ่านเยื่อบาง PES มีค่าสูงกว่าเพอมีเอทของเยื่อประกอบ PES/CH2P และเยื่อบางทั้งสองเพอมีเอทมีอัตราการลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรกของการกรอง ขณะที่เยื่อประกอบ PES/CH25PEG ให้อัตราการลดลงของเพอมีเอทช้ากว่า ดังนั้นการลดลงอย่างรวดเร็วของเพอมีเอทน่าจะหมายถึง BSA อุดตันได้เร็วกว่าด้วย และเยื่อบางสามารถกักกัน BSA ได้ต่ำด้วยในช่วงแรกของการกรอง หลังจากนั้นเพอมีเอทมีค่าคงที่ แสดงว่า BSA อุดตันเต็มที่และทำให้เยื่อบางมีความต้านทานคงที่ค่าหนึ่ง (ศึกษาในหัวข้อ 4.2.6)



(a) เยื่อบาง PES (●) และ เยื่อประกอบ PES/CH2P (■)



(b) เยื่อประกอบ PES/CH25PEG

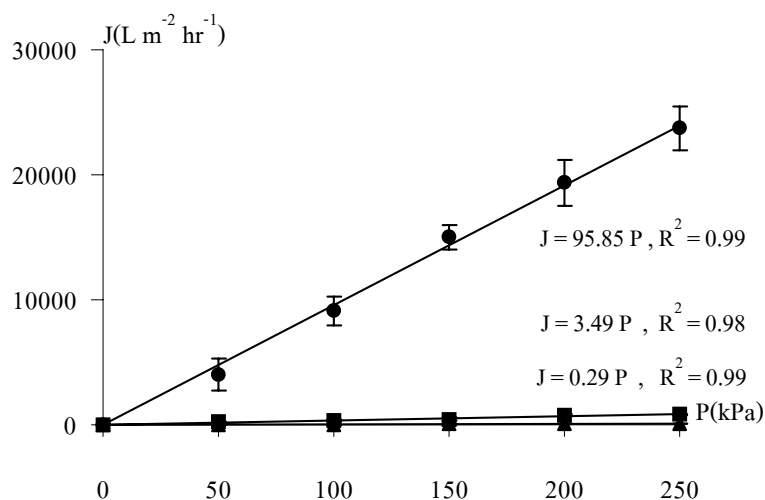
ภาพประกอบ 35 เพอมีเอทของสารละลาย BSA ผ่านเยื่อบาง 3 ชนิด เทียบกับเวลาที่ความดัน 100 kPa

ค่าการกักกัน BSA ของเยื่อบางทั้งสามชนิด แสดงในตาราง 12 จะเห็นว่าเยื่อประกอบ PES/CH2P สามารถกักกัน BSA ได้สูงกว่าเยื่อบาง PES ที่ทุกช่วงเวลาและค่ากักกันมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับเวลาของการกรอง แสดงว่าเวลาการกรองที่เพิ่มขึ้นทำให้ BSA เกิดการอุดตันมากขึ้นส่งผลให้มีค่าการกักกันสูงขึ้น และในช่วงเวลา 5 นาทีแรกของการกรองจะเห็นว่าเยื่อบางทั้งสองกักกัน BSA ได้น้อยซึ่งสอดคล้องกับเพอมีเอทมิ้อตราลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงเวลาดังกล่าว ส่วนเยื่อประกอบ PES/CH25PEG สามารถกักกัน BSA ได้ 100% ตลอดการกรอง อธิบายได้ว่า BSA อุดตันเต็มทีภายในช่วงเวลาแรกของการกรอง เมื่อเปรียบเทียบค่าการกักกัน BSA ของเยื่อบางแต่ละชนิด จะเห็นได้ว่าเยื่อประกอบทั้งสองชนิดสามารถกักกัน BSA ได้สูงกว่าเยื่อบาง PES ซึ่งเป็นเยื่อฐาน ทั้งนี้เนื่องจากไคโตซานเคลือบติดรูเยื่อบาง PES ทำให้รูมีขนาดเล็กลง ซึ่งแสดงว่าเยื่อประกอบ PES/CH25PEG น่าจะมีรูขนาดเล็กกว่าเยื่อประกอบ PES/CH2P

ตาราง 12 เปรียบเทียบค่าการกักกัน BSA ของ เยื่อประกอบ PES/CH2P และ PES/CH25PEG เทียบกับเยื่อบาง PES

t(min)	%Reject		
	เยื่อบาง PES	เยื่อประกอบ PES/CH2P	เยื่อประกอบ PES/CH25PEG
5	9.1 ± 3.6	33.8 ± 4.4	100.0 ± 0.0
15	25.7 ± 4.0	62.7 ± 3.7	100.0 ± 0.0
30	27.1 ± 2.0	79.5 ± 6.6	100.0 ± 0.0

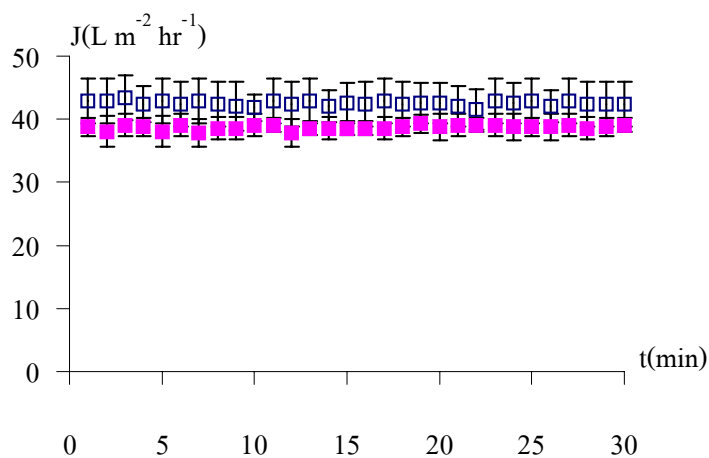
เพื่อทดสอบว่า BSA อุดตันในรูของเยื่อบางทั้งสามชนิด จึงนำเยื่อบางที่กรองสารละลาย BSA แล้วไปทำความสะอาดด้วยน้ำกลั่นตามวิธีการในข้อ 3.4.3 และทดสอบฟลักซ์น้ำดีอีกครั้ง ผลแสดงในภาพประกอบ 36 จะเห็นฟลักซ์น้ำดีของเยื่อประกอบ PES/CH25PEG และ PES/CH2P น้อยกว่าเยื่อฐานและเมื่อเปรียบเทียบกับฟลักซ์น้ำดีก่อนกรอง BSA พบว่าเยื่อทั้งสามมีฟลักซ์น้อยกว่า โดยจะนำค่าความชันของกราฟนี้ไปคำนวณหาค่าความต้านทานเนื่องจากการอุดตัน ( $R_p$ ) ในหัวข้อ 4.2.6



ภาพประกอบ 36 พลิกชันน้ำดีหลังจากการกรองสารละลาย BSA ของเยื่อบาง PES (●) เยื่อประกอบ PES/CH2P (■) และ PES/CH25PEG (▲) เทียบกับความดัน

#### 4.2.5 การกรองสารละลาย PEG ของเยื่อบาง

ใช้สารละลาย PEG เข้มข้น 50 ppm เป็นสารป้อนที่ความดันคงที่ 100 kPa ให้แก่เยื่อบางทั้งสามชนิด พบว่าเพอมีเอทของเยื่อบาง PES และเยื่อประกอบ PES/CH2P มีค่าเท่ากับ  $13,556 \text{ L m}^{-2} \text{ hr}^{-1}$  และ  $3,015 \text{ L m}^{-2} \text{ hr}^{-1}$  ตามลำดับ ที่ความดัน 100 kPa ส่วนเพอมีเอทของเยื่อประกอบ PES/CH25PEG ภาพประกอบ 37 แสดงเพอมีเอทของสารละลาย PEG จะเห็นว่าเพอมีเอทของสารละลาย PEG มีค่าคงที่ตลอด 30 นาทีของการกรองทำนองเดียวกันกับการกรอง BSA (ภาพประกอบ 35 b) แต่เพอมีเอทของสารละลาย PEG มีค่าสูงกว่า อธิบายได้ว่า PEG มีน้ำหนักโมเลกุลน้อยกว่า BSA ซึ่งมีขนาดเล็กกว่า BSA สามารถเคลื่อนผ่านเยื่อบางได้และบางส่วนอุดตันภายในรูพรุน ส่วนเพอมีเอทของสารละลาย PEG ที่มีน้ำหนักโมเลกุล 35,000 Da มีค่าต่ำกว่าเพอมีเอทของสารละลาย PEG ที่มีน้ำหนักโมเลกุล 10,000 Da แสดงว่า PEG น้ำหนักโมเลกุล 35,000 Da ทำให้เยื่อบางอุดตันมากกว่า ซึ่งค่าเพอมีเอทของสารละลายนี้จะนำไปคำนวณหาค่าความต้านทานการไหล  $R_p$  ในหัวข้อ 4.2.6



ภาพประกอบ 37 เอมิเททของสารละลาย PEG ที่มีน้ำหนักโมเลกุล (□) 10,000 Da และ (■) 35,000 Da ของเยื่อประกอบ PES/CH25PEG ที่ความดัน 100 kPa

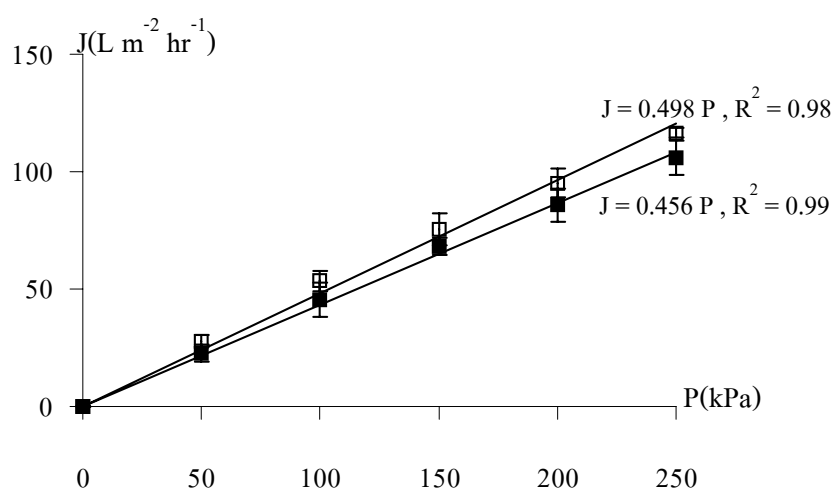
ตาราง 13 แสดงค่าการกักกัน PEG ของเยื่อบางทั้งสามชนิดเทียบกับเวลาของการกรอง จะเห็นว่าเยื่อบาง PES และเยื่อประกอบ PES/CH2P ไม่สามารถกักกัน PEG ได้ (% Reject = 0) ส่วนเยื่อประกอบ PES/CH25PEG สามารถกักกัน PEG ได้เพิ่มขึ้นตามเวลาของการกรอง โดยสามารถกักกัน PEG ที่มีน้ำหนักโมเลกุล 10,000 Da และ 35,000 Da ได้ 46% และ 64% ตามลำดับ ในนาทีที่ 30 ของการกรอง การที่เยื่อบางสามารถกักกัน PEG ที่มีน้ำหนักโมเลกุล 10,000 Da ได้น้อยกว่าแสดงว่าเยื่อบางมีการอุดตันน้อยจึงให้ค่าเอมิเททสูงกว่าซึ่งสอดคล้องกับเอมิเททของสารละลาย PEG (ภาพประกอบ 37) จากผลการทดลองนี้ทำให้ประมาณได้ว่าเยื่อประกอบ PES/CH25PEG มีรูเล็กกว่าเยื่อประกอบ PES/CH2P และเยื่อบาง PES

ตาราง 13 ค่าการกักกัน PEG ของเยื่อบาง PES เยื่อประกอบ PES/CH2P และ PES/CH25PEG

t(min)	%Reject					
	เยื่อบาง PES		เยื่อประกอบ PES/CH2P		เยื่อประกอบ PES/CH25PEG	
	MW 10,000	MW 35,000	MW 10,000	MW 35,000	MW 10,000	MW 35,000
5	0	0	0	0	22.4 ± 4.1	33.1 ± 2.8
10	0	0	0	0	39.0 ± 3.7	55.8 ± 7.3
30	0	0	0	0	46.4 ± 2.3	64.3 ± 4.6



เพื่อตรวจสอบว่าเพอมีอเทที่ลดลงจากการกรอง PEG เกิดการอุดตันในรูเยื่อบางในรูหรือบนผิวของเยื่อบาง จึงทำความสะอาดเยื่อประกอบ PES/CH25PEG หลังการกรองสารละลาย PEG ด้วยน้ำกลั่น ตามวิธีที่บรรยายในข้อ 3.4.3 แล้ววัดฟลักซ์น้ำดีอีกครั้ง ภาพประกอบ 38 เปรียบเทียบ ฟลักซ์น้ำดีของเยื่อบางที่กรอง PEG (MW 10,000 Da และ 35,000 Da) พบว่าฟลักซ์น้ำดีหลังจากการกรองสารละลาย PEG ที่มีน้ำหนักโมเลกุล 10,000 Da สูงกว่าฟลักซ์น้ำดีหลังจากการกรองสารละลาย PEG ที่มีน้ำหนักโมเลกุล 35,000 Da แสดงว่า PEG ที่มีน้ำหนักโมเลกุล 35,000 Da เกิดการอุดตันภายในรูของเยื่อบางสูงกว่า ส่วนความชันของกราฟทั้งสองนี้จะนำไปคำนวณหาค่า  $R_f$  ในหัวข้อ 4.2.6



ภาพประกอบ 38 ฟลักซ์น้ำดีหลังการกรองสารละลาย PEG ที่มีน้ำหนักโมเลกุล (□ 10,000 Da และ ■ 35,000 Da) ของเยื่อประกอบ PES/CH25PEG

#### 4.2.6 ค่าความต้านทานการไหลของเยื่อบาง PES เยื่อประกอบ PES/CH2P และ PES/CH25PEG

##### ก. ความต้านทาน $R_m$ ของเยื่อบาง

ค่า  $R_m$  คำนวณได้จากสมการ 2 โดยอาศัยจากความชันระหว่างฟลักซ์น้ำดีเทียบกับความดันจากภาพประกอบ 34 ผลการคำนวณแสดงในตาราง 14 จะเห็นว่าเยื่อประกอบ PES/CH25PEG มีค่าความต้านทานการไหลสูงกว่าเยื่อประกอบ PES/CH2P และเยื่อบาง PES แสดงว่าเยื่อบางที่ให้น้ำผ่านได้ดีกว่าย่อมมีค่า  $R_m$  ต่ำกว่า

ตาราง 14 ค่าความต้านทาน  $R_m$  ของเยื่อบาง PES เยื่อประกอบ PES/CH2P และ PES/CH25PEG

เยื่อบาง	$R_m$ ( $m^{-1}$ )
PES	$2.36 \times 10^{10}$
PES/CH2P	$9.63 \times 10^{10}$
PES/CH25PEG	$6.59 \times 10^{12}$

ข. ความต้านทาน  $R_f$  ของเยื่อบาง

ค่า  $R_f$  ของเยื่อบางเนื่องจากการอุดตันของ BSA และ PEG ในรูพรุน จำนวนได้จากสมการ 5 โดยอาศัยความชันจากภาพประกอบ 37 และ 39 ส่วนผลการคำนวณ  $R_f$  ได้แสดงในตาราง 15

ค. ความต้านทาน  $R_p$  ของเยื่อบาง

ค่า  $R_p$  ของเยื่อบางเนื่องจากการออของ BSA และ PEG ที่ผิวหน้าเยื่อบาง จำนวนได้จากสมการ 6 โดยอาศัยค่าเพอมีเอทที่คงที่จากภาพประกอบ 35 และ 37 จะได้ว่าเพอมีเอทของสารละลาย BSA ผ่านเยื่อบาง PES เยื่อประกอบ PES/CH2P และ PES/CH25PEG ขณะคงที่มีค่าเท่ากับ  $236.53 \pm 7.20$ ,  $92.27 \pm 7.13$  และ  $25.71 \pm 0.71$   $L m^{-2} hr^{-1}$  ตามลำดับ และจากภาพประกอบ 37 เพอมีเอทของสารละลาย PEG ที่มีน้ำหนักโมเลกุล 10,000 Da และ 35,000 Da ผ่านเยื่อประกอบ PES/CH25PEG มีค่าเท่ากับ  $42.35 \pm 3.57$  และ  $38.57 \pm 1.07$   $L m^{-2} hr^{-1}$  ตามลำดับ ซึ่งนำค่าเพอมีเอทนี้ไปคำนวณหาค่า  $R_p$

ตาราง 15 แสดงให้เห็นว่าค่า  $R_f$  จากการกรอง BSA และ PEG ของเยื่อประกอบ PES/CH25PEG มีค่าสูงกว่าค่า  $R_f$  ของเยื่อประกอบ PES/CH2P และเยื่อบาง PES ซึ่งค่า  $R_f$  ที่ได้สอดคล้องกับเปอร์เซ็นต์การกักกัน BSA และ PEG (ตาราง 12 และ 13) ส่วนค่าความต้านทานเนื่องจากการออของ BSA ที่ผิวหน้า ( $R_p$ ) ของเยื่อประกอบ PES/CH2P มีค่าสูงกว่าเยื่อประกอบ PES/CH25PEG และเยื่อบาง PES น่าจะมีสาเหตุจาก BSA มีรูปร่างเป็นโซ่ยาวจึงเกิดการออของ BSA ที่ผิวของเยื่อบางสูงกว่าการอุดตันภายในรูพรุนและสอดคล้องกับการลดลงของฟลักซ์น้ำดีหลังกรอง (หัวข้อ 4.2.4)

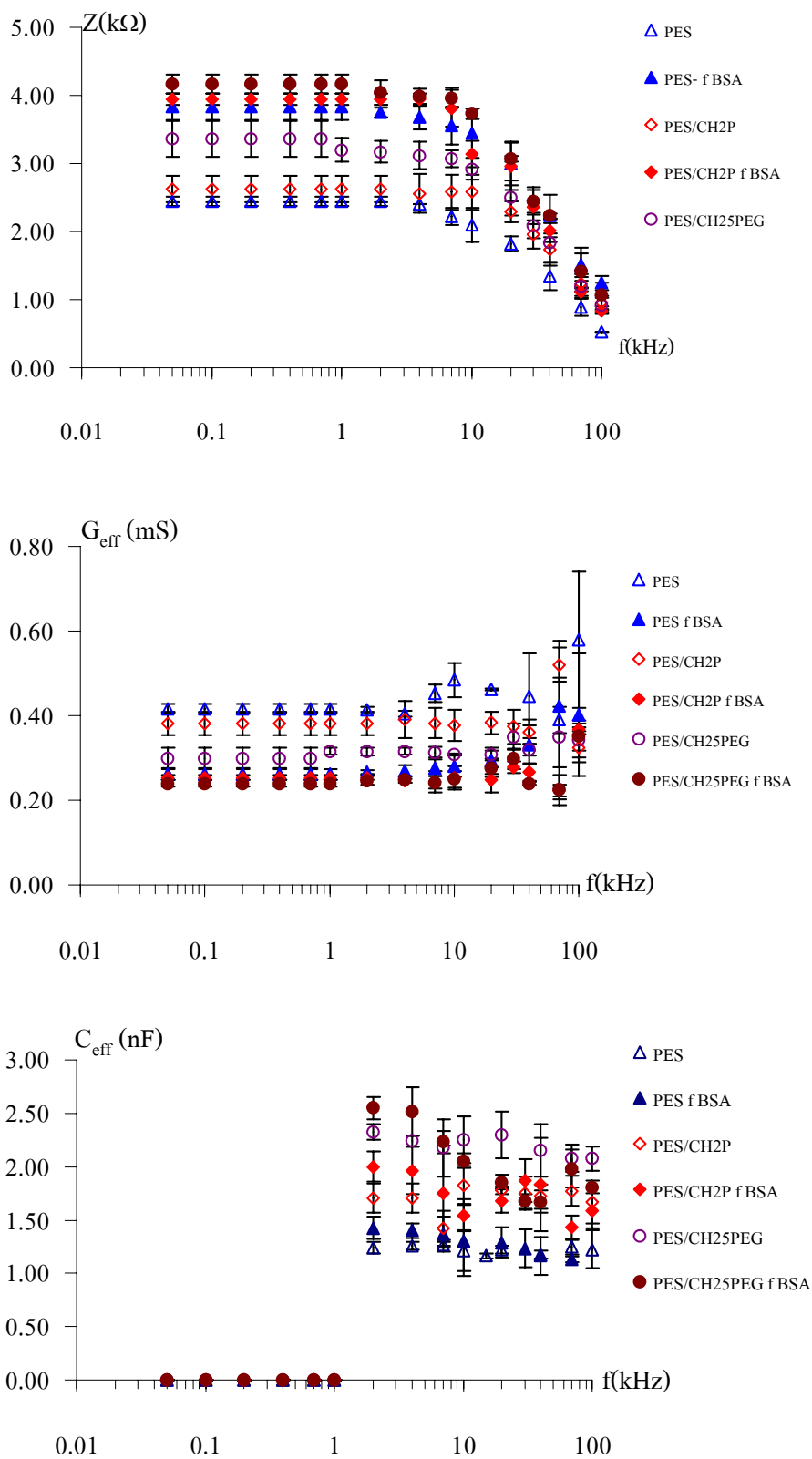
ตาราง 15 ความต้านทาน  $R_f$  และ  $R_p$  ของเยื่อบาง PES เยื่อประกอบ PES/CH2P และ PES/CH25PEG

$R$ ( $\times 10^{12} m^{-1}$ )	เยื่อบาง PES	เยื่อประกอบ PES/CH2P	เยื่อประกอบ PES/CH25PEG		
	กรอง BSA MW 67,000	กรอง BSA MW 67,000	กรอง PEG MW 10,000	กรอง PEG MW 35,000	กรอง BSA MW 67,000
$R_f$	0.02	1.12	1.96	2.75	8.19
$R_p$	1.75	3.40	1.50	1.70	1.77

#### 4.2.7 สมบัติทางไฟฟ้าของเยื่อบาง PES และเยื่อประกอบ PES/CH2P และ PES/CH25PEG

เพื่อเปรียบเทียบค่าทางไฟฟ้าของเยื่อบางแต่ละชนิดก่อนและหลังกรองสารละลาย ซึ่งทำการทดลองตามวิธีการในข้อ 3.4.5 ผลการศึกษาแสดงในภาพประกอบ 39 จะเห็นว่าอิมพีแดนซ์ (Z) ระหว่างความถี่ 50 Hz – 1 kHz ของเยื่อบางทั้งสามชนิด ค่า Z ของเยื่อประกอบ PES/CH25PEG มีค่าสูงกว่าเยื่อฐาน 40% และค่า Z ของเยื่อประกอบ PES/CH2P มีค่าสูงกว่าเยื่อฐาน 9% จากข้อมูลความหนาของเยื่อบางในตาราง 10 จะเห็นว่าการเคลือบไคโตซานแบบรีดบนผิวหน้ามีแนวโน้มทำให้ความหนาของเยื่อบางเพิ่มมากกว่าการเคลือบไคโตซานแบบอัดความดันซึ่งส่งผลให้ค่า Z สูงกว่าด้วย นอกจากนี้การเคลือบไคโตซานทำให้เยื่อฐานมีขนาดรูลดลงและทำให้ค่า Z สูงขึ้นด้วย สำหรับเยื่อบางที่กรอง BSA แล้ว เมื่อล้างเยื่อบางด้วยน้ำกลั่นตามวิธีการในข้อ 3.4.3 แล้ววัดสมบัติทางไฟฟ้าอีกครั้งพบว่าค่า Z ของเยื่อบาง PES เยื่อประกอบ PES/CH2P และ PES/CH25PEG หลังจากการกรอง BSA มีค่าเพิ่มขึ้น แสดงว่า BSA อุดตันภายในรูของเยื่อบาง โดยค่า Z เนื่องจากการอุดตันของ BSA ของเยื่อประกอบ PES/CH25PEG มีค่าสูงสุด ซึ่งสอดคล้องกับค่าการกันกัน BSA (ตาราง 15)

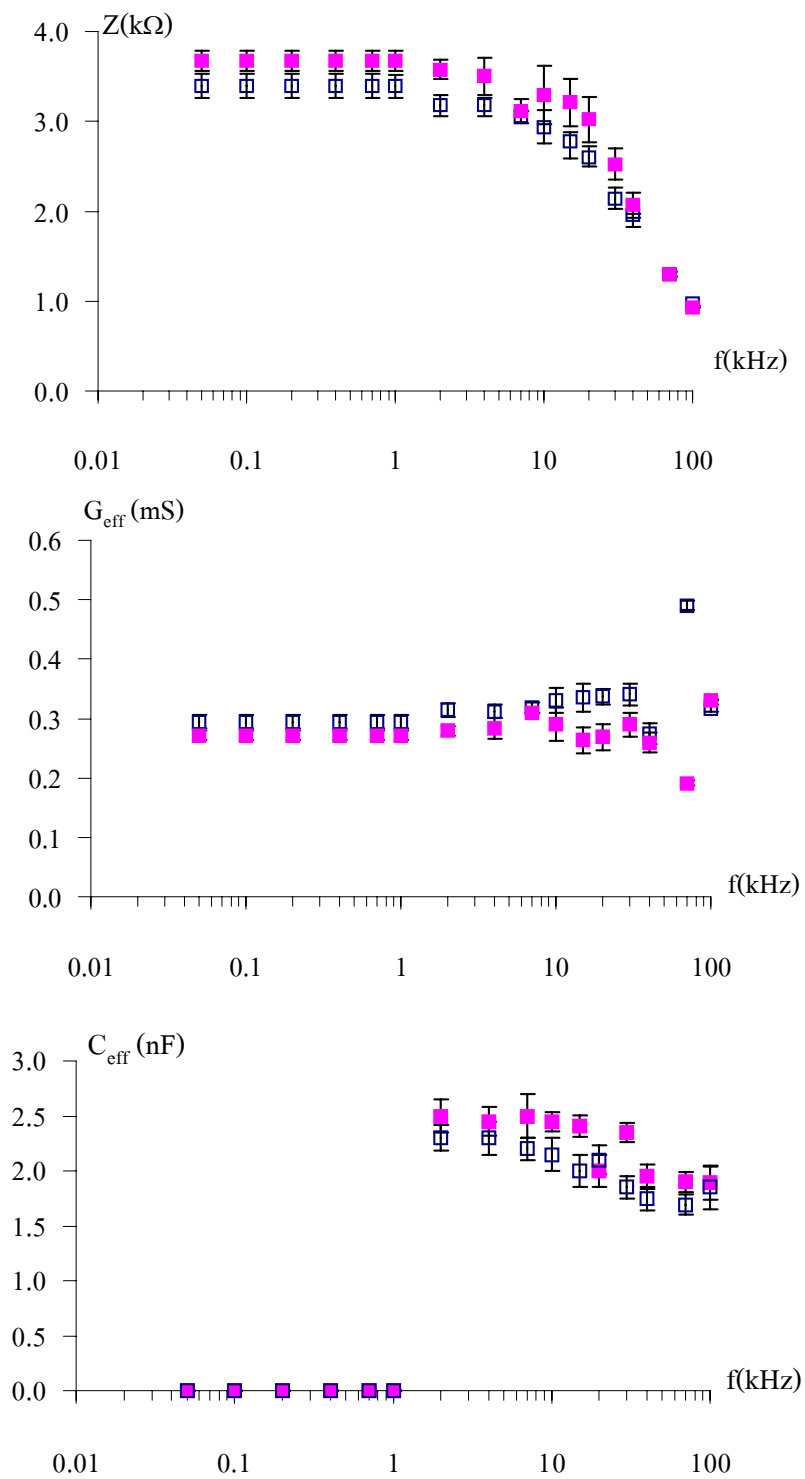
สำหรับค่าความนำไฟฟ้า ( $G_{eff}$ ) ระหว่างความถี่ 50 – 1 kHz ของเยื่อบาง PES เยื่อประกอบ PES/CH2P และ PES/CH25PEG มีค่าเท่ากับ  $0.42 \pm 0.01$  ,  $0.38 \pm 0.03$  ,  $0.29 \pm 0.02$  mS ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นว่าค่า  $G_{eff}$  มีค่าแปรผกผันกับค่า Z และยังแปรผันตรงกับค่าฟลักซ์น้ำดี คือ ค่าฟลักซ์สูง ความนำไฟฟ้าจะสูง ค่า Z มีค่าต่ำ และหลังกรองสารละลาย BSA ด้วยเยื่อบางทั้งสามพบว่า  $G_{eff}$  มีค่าลดลงเป็น  $0.26 \pm 0.01$  ,  $0.25 \pm 0.01$  ,  $0.24 \pm 0.01$  mS ตามลำดับ ส่วนค่าความจุไฟฟ้า ( $C_{eff}$ ) ในช่วงความถี่ 50 – 1 kHz มีค่าเท่ากับศูนย์ และที่ความถี่ 2 kHz ค่า  $C_{eff}$  ของเยื่อบาง PES เยื่อประกอบ PES/CH2P และ PES/CH25PEG มีค่าเท่ากับ  $1.24 \pm 0.06$  ,  $1.71 \pm 0.13$  ,  $2.33 \pm 0.11$  nF ตามลำดับ และหลังจากกรองสารละลาย BSA ค่า  $C_{eff}$  ของเยื่อบางทั้งสามมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น  $1.43 \pm 0.11$  ,  $2.00 \pm 0.14$  ,  $2.55 \pm 0.07$  nF ตามลำดับ



ภาพประกอบ 39 ค่าของ  $Z$ ,  $G_{eff}$ ,  $C_{eff}$  กับความถี่ เชื่อบาง PES เชื่อบางประกอบ PES/CH2P และ PES/CH25PEG ก่อนและหลังกรองสารละลาย BSA

ผลการกรองสารละลาย PEG ด้วยเยื่อบางทั้งสามชนิด พบว่าเยื่อประกอบ PES/CH25PEG สามารถกรอง PEG ได้ (ตาราง 13) ดังนั้นจึงวัดสมบัติทางไฟฟ้าของเยื่อประกอบนี้หลังจากการกรองสารละลาย PEG ที่มีน้ำหนักโมเลกุล 10,000 Da และ 35,000 Da ผลการวัดแสดงในภาพประกอบ 40 จะเห็นว่าค่า  $Z$  ในระหว่างความถี่ 50 Hz – 1 kHz ของเยื่อประกอบหลังจากการกรอง PEG ที่มีน้ำหนักโมเลกุล 35,000 Da มีค่าสูงกว่าจากการกรอง PEG ที่มีน้ำหนักโมเลกุล 10,000 Da แสดงว่า PEG น้ำหนักโมเลกุล 35,000 Da เกิดการอุดตันภายในรูพรุนมากกว่า ซึ่งผลสอดคล้องกับค่าการกักกัน PEG (ตาราง 13) และค่าความต้านทานเนื่องจากการอุดตัน ( $R_p$ ) (ตาราง 15)

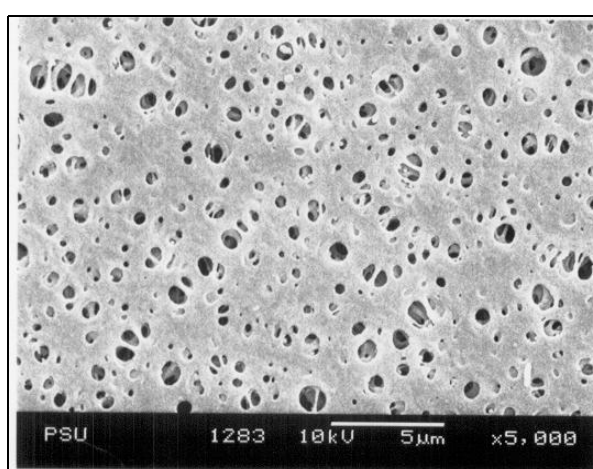
ผลของความนำไฟฟ้า ( $G_{eff}$ ) ระหว่างความถี่ 50 – 1 kHz ของเยื่อประกอบ PES/CH25PEG หลังจากการกรองสารละลาย PEG จะเห็นว่ากรกรอง PEG ที่มีน้ำหนักโมเลกุล 10,000 Da มีค่า  $G_{eff}$  สูงกว่าการกรอง PEG ที่มีน้ำหนักโมเลกุล 35,000 Da แสดงว่า PEG น้ำหนักโมเลกุล 10,000 Da เกิดการอุดตันภายในรูน้อยกว่า ส่วนค่า  $C_{eff}$  ระหว่างความถี่ 50 – 1 kHz มีค่าเป็นศูนย์ และที่ความถี่ 2 kHz มีค่า  $C_{eff}$  หลังจากการกรอง PEG น้ำหนักโมเลกุล 35,000 Da มีค่า  $C_{eff}$  สูงกว่าการกรอง PEG น้ำหนักโมเลกุล 10,000 Da ทั้งนี้เนื่องจากการ PEG น้ำหนักโมเลกุล 35,000 Da เกิดการอุดตันสูงกว่า



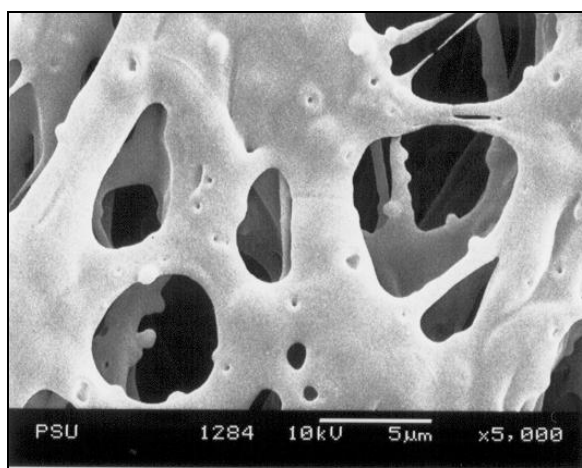
ภาพประกอบ 40 ค่าของ  $Z$ ,  $G_{\text{eff}}$ ,  $C_{\text{eff}}$  กับความถี่ ของเยื่อประกอบ PES/CH25PEG หลังจากการกรองสารละลาย PEG (□ PEG 10,000 และ ■ PEG 35,000)

#### 4.2.8 ภาพถ่ายเยื่อบาง PES เยื่อประกอบ PES/CH2P และ PES/CH25PEG จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

ภาพประกอบ 41 แสดงภาพถ่าย SEM ของเยื่อบาง PES ซึ่งเป็นเยื่อฐานที่ใช้สำหรับเคลือบไคโตซาน จะเห็นว่าด้านหน้าของเยื่อบางมีขนาดรูเล็กกว่าด้านหลัง และจากการใช้โปรแกรมคาร์นอยวิเคราะห์หาขนาดรูด้านหน้าของเยื่อบาง ผลแสดงในภาพประกอบ 42 พบว่าเยื่อบางมีขนาดรูเฉลี่ย  $0.26 \pm 0.15$  ไมครอน ขณะที่รูเฉลี่ยที่ระบุมาในเชิงการค้า คือ 0.22 ไมครอน และความพรุนเฉลี่ยด้านหน้าของเยื่อบาง PES มีค่าเท่ากับ 6.38 %

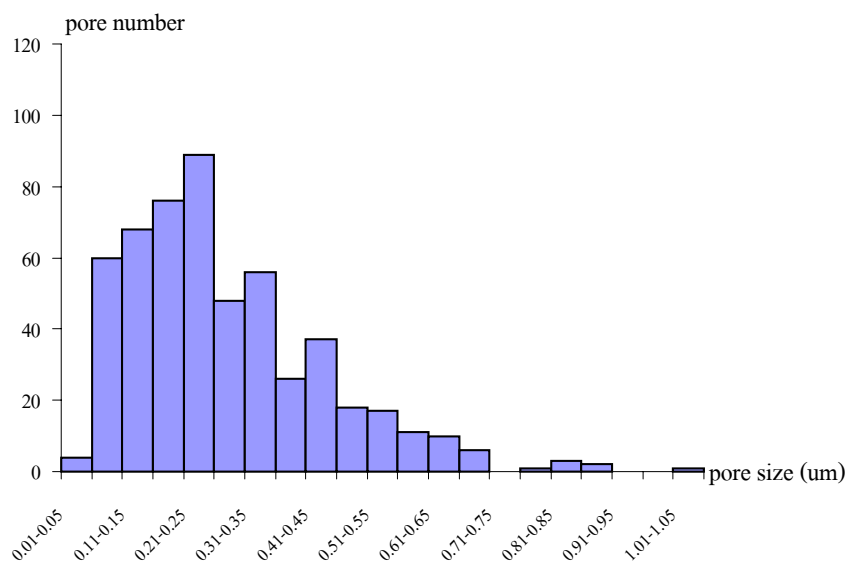


(a) ด้านหน้า



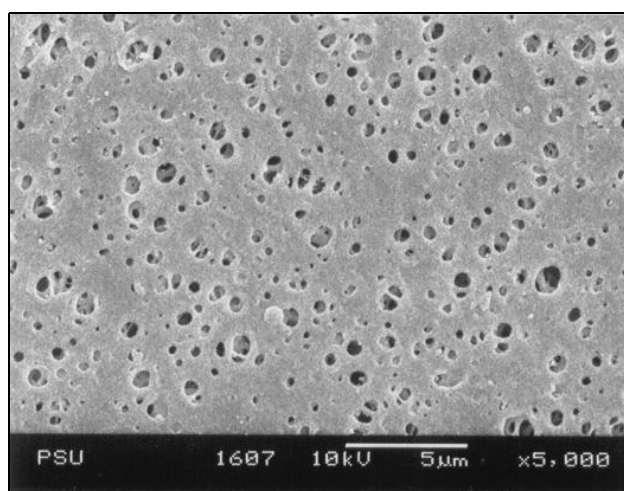
(b) ด้านหลัง

ภาพประกอบ 41 ภาพถ่าย SEM ของเยื่อบาง PES



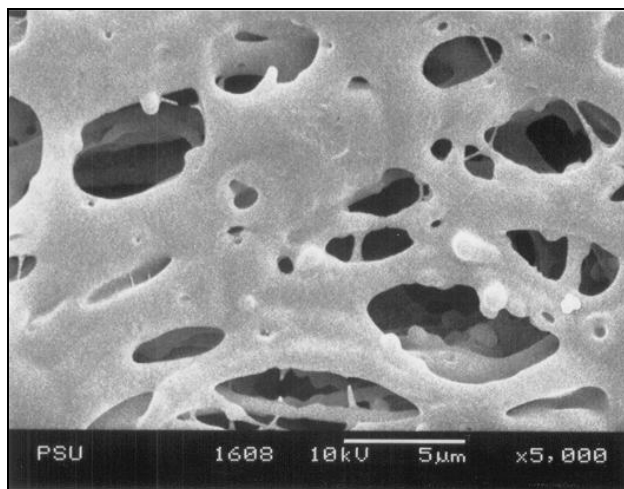
ภาพประกอบ 42 จำนวนรูและขนาดรู ด้านหน้าของเยื่อบาง PES ต่อพื้นที่เยื่อบาง  $522.38 \mu\text{m}^2$

จากภาพประกอบ 43 แสดงภาพถ่าย SEM ของเยื่อประกอบ PES/CH2P ซึ่งเคลือบไคโตซานแบบอัดความดัน จะเห็นว่าด้านหน้าของเยื่อบางมีขนาดรูเล็กกว่าด้านหลัง และภาพประกอบ 44 แสดงจำนวนรูและขนาดรูของเยื่อประกอบ พบว่ามีขนาดรูเฉลี่ย  $0.22 \pm 0.12$  ไมครอน ความพรุน 3.59 % เมื่อเปรียบเทียบกับขนาดรูใหญ่ที่สุดของเยื่อบาง PES (ภาพประกอบ 42) จะเห็นว่าเยื่อประกอบ PES/CH2P มีขนาดรูใหญ่ลดลงเป็น 0.70 ไมครอน แสดงว่าการเคลือบไคโตซานแบบอัดความดันทำให้ขนาดรูของเยื่อฐานมีขนาดรูลดลง



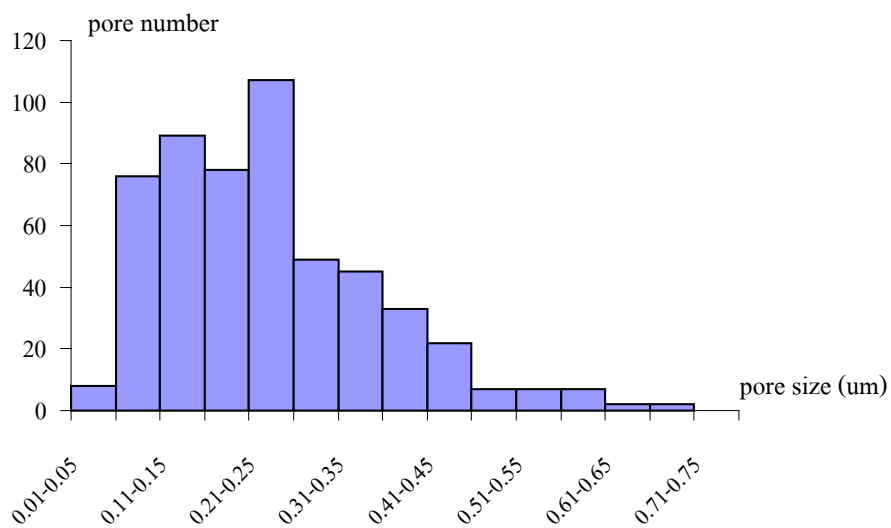
(a) ด้านหน้า





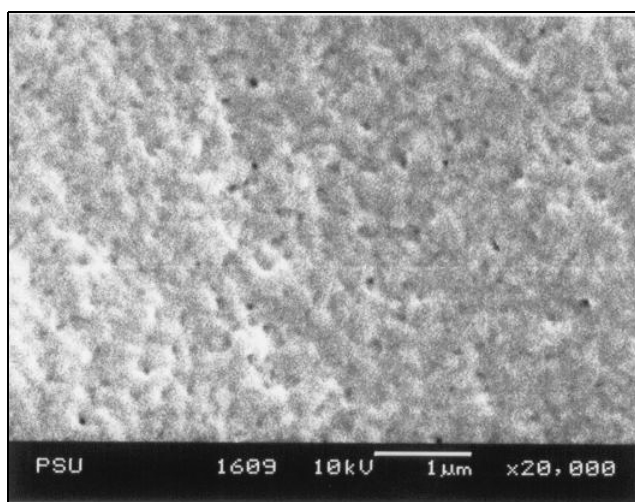
(C) ด้านหลัง

ภาพประกอบ 43 ภาพถ่าย SEM ของเยื่อประกอบ PES/CH2P

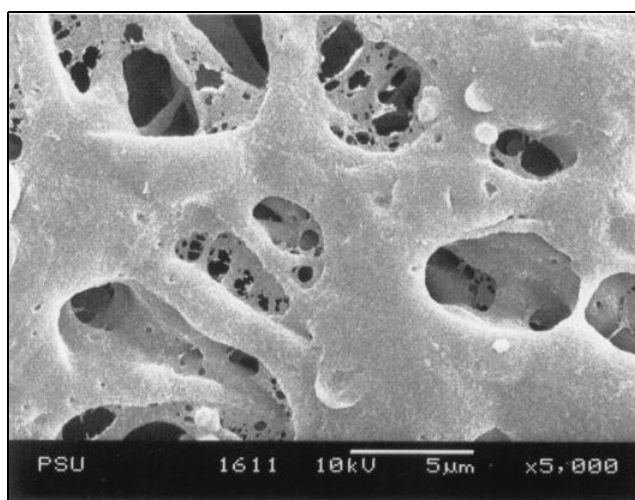


ภาพประกอบ 44 ขนาดรูและจำนวนรู ด้านหน้าของเยื่อบาง PES/CH2P ต่อพื้นที่เยื่อบาง  $522.38 \mu\text{m}^2$

จากภาพประกอบ 45 แสดงภาพถ่าย SEM ของเยื่อประกอบ PES/CH25PEG ซึ่งเคลือบไคโตซานแบบรีดบนผิวหน้า จะเห็นว่าด้านหน้ามีไคโตซานเคลือบติดตลอดทั้งผิวหน้าของเยื่อฐาน ส่วนด้านหลังของเยื่อประกอบมีขนาดรูโตกว่า และจากภาพประกอบ 46 แสดงจำนวนรูและขนาดรูของเยื่อประกอบ พบว่ามีขนาดรูเฉลี่ย  $0.04 \pm 0.01$  ไมครอน และความพรุนเฉลี่ย (Porosity) เท่ากับ 0.08%

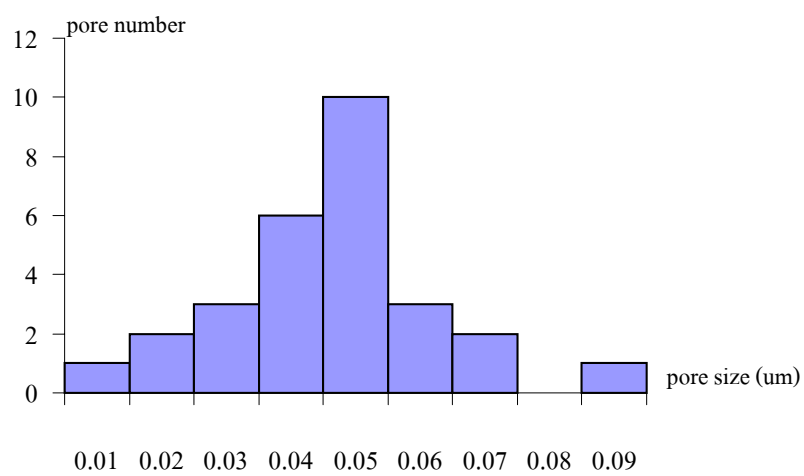


(a) ด้านหน้า



(c) ด้านหลัง

ภาพประกอบ 45 ภาพถ่าย SEM เยื่อประกอบ PES/CH25PEG



ภาพประกอบ 46 ขนาดรูและจำนวนรู ด้านหน้าของเยื่อบาง PES/CH25PEG ต่อพื้นที่เยื่อบาง  $32.69 \mu\text{m}^2$